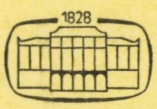
MŰSZAKI TUDOMÁNY

A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA MŰSZAKI TUDOMÁNYOK OSZTÁLYÁNAK KÖZLEMÉNYEI

SZERKESZTI: MAJOR MÁTÉ

45. KÖTET
1—2. SZÁM



AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST 1972

MŰSZ. TUD.

MŰSZAKI TUDOMÁNY

A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA MŰSZAKI TUDOMÁNYOK OSZTÁLYÁNAK KÖZLEMÉNYEI

SZERKESZTŐ BIZOTTSÁG
BARTA ISTVÁN, BÖLCSKEI ELEMÉR, GESZTI P. OTTÓ,
LÉVAI ANDRÁS

SZERKESZTŐSÉG: BUDAPEST V., MÜNNICH FERENC UTCA 7.
KIADÓHIVATAL: BUDAPEST V., ALKOTMÁNY UTCA 21.

A *Műszaki Tudomány* változó terjedelmű füzetekben jelenik meg. Négy füzet alkot egy kötetet.

A kéziratok a következő címre küldendők:

Magyar Tudományos Akadémia
Műszaki Tudomány
Budapest V., Münnich Ferenc utca 7.

Ugyanerre a címre küldendő minden szerkesztőségi levelezés.

A közlésre el nem fogadott kéziratokat a szerkesztőség lehetőleg visszajuttatja a szerzőhöz, de felelősséget a beküldött kéziratok megőrzéséért vagy továbbításáért nem vállal.

A *Műszaki Tudomány* előfizetési ára kötetenként 60 forint. Belföldi megrendelések az Akadémiai Kiadó (Budapest V., Alkotmány utca 21. Pénzforgalmi jelzőszám 215—11488), külföldi megrendelések a „Kultúra" Könyv- és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat (Budapest I., Fő utca 32., Pénzforgalmi jelzőszám: 218—10990) útján eszközölhetők.

TARTALOMJEGYZÉK

HALÁSZ DÉNES 1891—1971 3

A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK OSZTÁLYÁNAK 1971 MÁJUS 7-ÉN TARTOTT KIBŐVÍTETT OSZTÁLYÜLÉSE

Bognár Géza; Beszámoló a Műszaki Tudományok Osztályának 1970. évi tevékenységéről 5
Függelék az osztályelnöki beszámolóhoz 9
Hozzászólások az osztályelnöki beszámolóhoz 21
Széchy Károly 21
Csanádi György 24
Lévai András 26
Szigeti György 29
Eisler János 32
Kovács K. Pál 32
Jándy Géza 33
Bognár Géza: Válasz az elhangzott hozzászólásokra 33

TANULMÁNYOK

Csáki Frigyes—Keviczky László—Kovács Tivadar: Lineáris szabályozások optimális szintézise digitális számítógépen, I—II. rész 35
Prohászka János: Hexagonális kristályok sztereografikus pólusábráinak meghatározása szerkesztés nélkül 57
Keviczky László—Csáki Frigyes: Holtidős szabályozási körök tervezése időtartományban 71
Janositz János: Minták optimális elhelyezési stratégiája, ha a mintaérték egy síktartományon folyamatosan változó függvény 93
Budincsevits Andor: Nagy áramsűrűségű készletkatódok 101
Hajdú László—Zahorán János: Újabb kutatási eredmények légmentesen lezárt miniatűr ezüst-cink akkumulátorok terén 115
Sebők Ferenc; Bordás kialakítású, újszerű reaktortartály falában fellépő hőmérsékleteloszlás vizsgálata 141
Zámbó János—Molnár Lajos: A vanádiumtartalom részleges oldódásának okai a magyar bauxitok Bayer-eljárás szerinti feldolgozásakor 153
Varga László: Ortogonális anizotróp szerkezeti anyagú hengeres héjak hajlításelméletének tárgyalása az eltolódásfüggvény bevezetésével 175
Paláncz Béla—Parti Mihály: Szárítóberendezések számítógépi méretezése 197
Singer Dénes: Rúdszerkezetek hálózatelméletéről 223
Gáspár Zsolt: Rúdszerkezetek stabilitásvizsgálata 243

KÖNYVSZEMLE

Bogárdi J.: Vízfolyások hordalékszállítása (Starosolszky Ö.;) 251
Betontechnische Berichte (Goschy B.) 252
Beton-Kalender 1971 (Csonka P.) 253
Costruzioni in Cemento Armato (Szmodits K.) 254
Kussl V.: Datenverarbeitung mit Pl/1 (Jándy G.) 254
Gyemidovics, B. P.: Matematikai Analízis. Feladatgyűjtemény (Barta J.) 255
Helm, L.—Marton, J.: Einführung in die Fluidik (Gedeon J.) 256
Makhult, M.: Schwingungstechnische Bemessung von Maschinenlagerungen (Bosznay Á.) 256
Pelikán J.: Statika (Cholnoky T.) 258
Proceedings of the International Conference on the Physics and Chemistry of Semiconductor Heterojunctions and Layer Structures (Bitó J.) 259
Szabó G.: Die Grundlagen einer neuen Festigkeitstheorie, I. kötet. (Szabó J.) 260
Géher, K.: Theory of Network Tolerances (Bitó J.) 260
Szabó J.—Roller B.: Rúdszerkezetek elmélete és számítása (Bosznay Á.) 261
Építőmérnöki Szakirodalomkutatás (Kunszt Gy.) 262

KÖZLEMÉNYEK

Építőipari mérnöki nemzetközi szervezetek összekötő bizottságáról (Sebestyén, Gy.) 263
A Nemzetközi Hidraulikai Kutatási Szövetség XIV. kongresszusa 266
A TMB hírei 267

INHALTSVERZEICHNIS

D. HALÁSZ 1891–1971 3

ERWEITERTE ABTEILUNGSSITZUNG DER ABTEILUNG DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN AM 7. MAI 1971

Bognár, G.: Bericht über die Tätigkeit der Abteilung der Technischen Wissenschaften im Jahre 1970. 5
Anhang zum Bericht des Abteilungsvorsitzenden 9
Széchy, K. 21
Csanádi, Gy. 24
Lévai, A. 26
Szigeti, Gy. 29
Eisler, J. 32
Kovács, K. P. 32
Jándy G. 33
Bognár, G.: Beantwortung der Beiträge 33

ABHANDLUNGEN

Csáki, Fr. — *Keviczky, L.* — *Kovács, T.*: Optimaler Entwurf von linearen Regelungssystemen mit Hilfe von Digitalrechnern 35
Prohászka, J.: Bestimmung der stereographischen Polbilder von hexagonalen Kristallen ohne Zeichnen 57
Keviczky, L. — *Csáki, Fr.*: Projektierung von Regelkreisen mit Totzeit im Zeitbereich 71
Janositz, J.: Optimale Strategie für die Verteilung der Proben, wenn der untersuchte Wert eine in einem ebenen Bereich kontinuierlich veränderliche Funktion ist 93
Budincsevits, A.: Vorratskathoden mit hoher Stromdichte 101
Hajdu, L. — *Zahorán, J.*: Neue Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der hermetisch verschlossenen miniatür Silber-Zink Akkumulatoren 115
Sebők, F.: Untersuchung der Temperaturverteilung in der gerippten Behälterwand eines Reaktorbehälters neuesten Systems 141
Zámbó, J. — *Molnár, L.*: Ursachen des teilweisen Inlösungsgehens des Vanadiumgehalts bei der Verarbeitung der ungarischen Bauxite nach dem Bayer-Verfahren 153
Varga, L.: Behandlung der Biegetheorie von zylindrischen Schalen aus orthogonal anisotropischen Material mittels Einführung der Verschiebungsfunktion 175
Paláncz, B. — *Parti, M.*: Dimensionierung von Trockeneinrichtungen mit Hilfe von Rechnern 197
Singer, D.: Über die Netzwerktheorie von Trägerkonstruktionen 223
Gáspár, Zs.: Stabilitätsprüfung von Stabkonstruktionen 243

BUCHBESPRECHUNG

Bogárdi J.: Vízfolyások hordalékszállítása (Starosolszky Ö.) 251
Betontechnische Berichte (Goschy, B.) 252
Beton-Kalender 1971 (Csonka, P.) 253
Costruzioni in Cemento Armato (Szmodits, K.) 254
Kussl, V.: Datenverarbeitung mit (Pl./1 (Jándy, G.) 254
Gyemidovics, B. P.: Matematikai Analízis Feladatgyűjtemény (Barta, J.) 255
Helm, L. — *Marton, J.*: Einführung in die Fluidik (Gedeon, J.) 256
Makhult, M.: Schwingungstechnische Bemessung von Maschinenlagerungen (Bosznay, Á.) 256
Pelikán, J.: Statika (Cholnoky, F.) 258
Proceedings of the International Conference on the Physics and Chemistry of Semiconductor Heterojunctions and Layer Structures (Bitó, J.) 259
Szabó, G.: Die Grundlagen einer neuen Festigkeitstheorie, I. Band (Szabó, J.) 260
Géher, K.: Theory of Network Tolerances (Bitó, J.) 260
Szabó, J. — *Roller, B.*: Rúdszerkezetek elmélete és számítása (Bosznay, Á.) 261
Építőmérnöki szakirodalomkutatás (Kunszt, Gy.) 262

MITTEILUNGEN

Über den Verbindungsausschusses der internationalen Ingenieurorganisationen der Bauindistrie 263
XIV. Kongress der IAHR 266
Nachrichten des wissenschaftlichen Qualifizierungsauschusses 267

CONTENT

D. HALÁSZ 1891—1971 3

EXTENDED MEETING OF THE DEPARTMENT OF TECHNICAL SCIENCES HELD THE 7 MAY 1971.

Bognár, G.: Report on the Work of the Department of Technical Sciences in 1970 5
Annex to the Report of the Departments President 9
Contributions to the Report of the Departments President 21
Széchy, K. 21
Csanádi, Gy. 24
Lévai, A. 26
Szigeti, Gy. 29
Eisler, J.; 32
Kovács, K. P. 32
Jándy, G. 33
Bognár, G.: Reply to the Contributions 33

PAPERS

Csáki, Fr.—Keviczky, L.—Kovács, T.: Optimum Synthesis of Linear Controls by Digital Computer 35
Prohászka, J.: Determination of the Stereographic Pole Figures of Hexagonal Crystals, without Plotting 57
Keviczky, L.—Csáki, Fr.: Design Control Systems with Dead Time in the Time Domain .. 71
Janositz, J.: Strategy of Optimum Placing of Samples, if the Sampled Value is a Function Continuously Varying in a Plane Area 93
Budincsevits, A.: Dispenser Cathodes with High Current Density 101
Hajdu, L.—Zahorán, J.: New Results in Research on Hermetically Sealed Miniature Silver-Zinc Storage Cells 115
Sebők F.: Investigation of the Distribution of Temperature within the Ribbed Wall of a Reactor-Vessel of New Type 141
Zámbó J.—Molnár, L.: Causes of the Partial Dissolution of the Vanadium Content in the Bayer Processing of Hungarian Bauxites 153
Varga, L.: Discussion of the Bending Theory of Cylindrical Shells of Orthogonally Anisotropic Structural Material, by Introducing the Displacement Function 175
Paláncz, B.—Parti, M.: Computerized Dimensioning of Drying Facilities 197
Singer, D.: Stability Test of Bar Structures 223
Gáspár, Zs.: Stability of Framerworks 243

BOOKS REVIEW

Bogárdi J.: Vízfolyások hordalékszállítása (Starosolszky, O.) 251
Betontechnische Berichte (Goschy, B.) 252
Beton-Kalender 1971 (Csonka, P.) 253
Costruzioni in Cemento Armato (Szmodits, K.) 254
Kussl, V.: Datenverarbeitung mit Pl/1 (Jándy, G.) 254
Gyemidovics, B. P.: Matematikai Analízis Feladatgyűjtemény (Barta, J.) 255
Helm, L.—Marton, J.: Einführung in die Fluidik (Gedeon, J.) 256
Makhult, M.: Schwingungstechnische Bemessung von Maschinenlagerungen (Bosznay, Á.) 256
Pelikán, J.: Statika (Cholnoky, T.) 258
Proceedings of the International Conference on the Physics and Chemistry of Semiconductor Heterojunctions and Layer Structures (Bitó, J.) 259
Szabó G.: Die Grundlagen einer neuen Festigkeitstheorie, Vol. I. (Szabó, J.) 260
Géher, K.: Theory of Network Tolerances (Bitó, J.) 860
Szabó, J.— Roller, B.: Rúdszerkezetek elmélete és számítása (Bosznay, Á.) 261
Építőmérnöki szakirodalomkutatás (Kunszt, Gy.) 262

COMMUNICATIONS

On the Joint Committee of the International Engineering Organisation of Building Industry 263
XIV. Conference of the IAHR 266
Communications of the Scientifique Qualificative Committee 267

СОДЕРЖАНИЯ

Денеш Халас 1891—1971 .....

Расширенное заседание отдела технических наук, состоявшееся 7-го Мая 1981 г. 3

Геза Богнар: Отчёт о деятельности Отдела технических наук за 1970 г. 5
Приложение к отчёту председателя отдела 9
Выступления к отчёту председателя отдела 21
Карой Сечи 21
Дьёрдь Чанади 24
Андраш Леваи 26
Дьёрбь Сигети .....
Янош Эйзлер 29
Пал К. Ковач 32
Геза Янди 33
Ответы Геза Богнара на выступления 33

Работы

Фридеш Чаки—Ласло Кевицки—Тивадар Ковач: Оптимальный синтез линейных регуляций на цифровой вычислительной машине 35
часть I—II 57
Янош Прохаска: Определение стереографического изображения полюсов гексагональных кристаллов без построения .....
Ласло Кевицки—Фридеш Чаки: Проектирование циклов регулирования с мертвым временем в области времени 71
Янош Яношитз: Стратегия оптимального расположения образцов, если эталоном является в области плоскости беспрерывно переменная функция 93
Андор Будинчевич: Набор катодов с большой плотностью тока 101
Ласло Хайду—Янош Захоран: Новые результаты исследования в области герметически закрытых миниатюрных цинково-серебряных аккумуляторов 115
Ференц Шебёк: Исследование распределения температуры в стенке бака реактора нового типа с ребристым выполнением 141
Янош Замбо—Лайош Варга: Причины частичной растворимости содержания ванадия при обработке венгерских бокситов методом Байера 153
Ласло Варга: Изложение теории изгибания цилиндрических оболочек из материалов ортогонально анизотропной структуры с помощью введения функции сдвига 175
Бела Паланц—Михай Парти: Расчёт сушильных установок на вычислительных машинах 197
Денеш Зингер: О теории сети стержневых конструкций 223
Жолт Гашпар: Исследование стабильности стержневых конструкций 243

Обзор книг

Й. Богарди: Перенос наносов водостоками (Э. Старосолски) 251
Бетонтехнише Берихте (Гоши Б.) 252
Бетон-Календер 1971. (Н. Чонка) 253
Конструкции из армированного цемента (К. Смодич) 254
Куссл В.: Датенферарбейтунт миг Пл (Г. Янди) 254
Демидович Б. П.: Сборник задач по математическому анализу (И. Барта) 255
Л. Хелм—И. Мартон: Эйнфюрунг ин ди филюидик (И. Гедеон) 256
М. Макгульт: Швингунгстехнише бемессунг фон машиненлагерунген (А. Боснан) ... 256
И. Пеликан: Статика (Т. Чолноки) 258
Проседингс оф те интернашионал конференс он те физикс энд кемистри оф семикондюктор гетерожонксионс энд лейер стрюктурс (И. Бито) 259
Г. Сабо: Ди грундлаген эйнер фестигейтстеори. Том I. (И. Сабо) 260
К. Гехер: Теори оф нетворк толеранс (И. Бито) 260
И. Сабо—Б. Роллер: Теория и расчёт стержневых конструкций (А. Боснан) 261
Международное исследование по гидравлике (Старосолски) .....
Исследование специальной литературы в области инженерства строения (Д. Кунст) 262

СООБЩЕНИЯ

О комитате связи международных организаций инженеров строительной промышленности (Д. Шебештьен) 263
Известия Научной квалификационной комиссии ВАН 267

MŰSZAKI TUDOMÁNY

A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA MŰSZAKI TUDOMÁNYOK OSZTÁLYÁNAK KÖZLEMÉNYEI

SZERKESZTI: MAJOR MÁTÉ

45. KÖTET

AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST 1972

HALÁSZ DÉNES

1891—1971

Dr. HALÁSZ Dénes 1971. augusztus 4-én halt meg. Személyében kiváló tudóst és műszaki szakembert vesztettünk el. A villamosenergia-termelés közvetlen energiaátalakítással való megvalósításának világviszonylatban egyik úttörője volt. A magnetohidrodinamikus generátor feltalálása az ő nevéhez fűződik.

Tárnokon született 1891. június 7-én. Egyetemi tanulmányait a Budapesti Műszaki Egyetemen 1912-ben fejezte be. A Budapesti Fővárosi Elektromos Műveknél 1922-ben kezdte pályafutását és műszaki munkássága a magyar villamosenergia-rendszer fejlődéséhez kapcsolódott. Kiváló műszaki képességeit korán megismerték. Az annak idején jelentékeny méretű Kelenföldi Erőmű építkezését nagy szakértelemmel irányította. Az ő munkája volt továbbá a Mátravidéki Erőmű tervezésének, építésének és a háború befejeztével újjáépítésének műszaki vezetése. A magyar villamos energiaipar államosítása utáni első évtizedben a létesülő erőművek gépészeti felépítésének egységes elvek szerinti kialakításában, jó műszaki megoldások kiválasztásában, a tervezési munkálatokban irányító szerepe volt. Az ERŐTERV egyik irodavezetőjeként 1957. november 27-én vonult nyugalomba, de műszaki munkásságát az Akadémia és a Műszaki Társadalmi Egyesülés tudományos bizottságaiban tovább folytatta. Nemzetközi tudományos konferenciákon továbbra is részt vett.

Mint kiváló mérnök még a harmincas években felismerte annak szükségét, hogy a villamosenergia-igények 8—10 évenkénti kétszereződése miatt a villamosenergia-termelés korszerűsítéséhez új megoldásokat is kell keresni. Így dolgozta ki KARLOVITZ Bélával együtt a magnetohidrodinamikus generátor első műszaki megoldását, amely 1936-ban világszabadalmat kapott. Ezzel az eljárással 1000 MW-ot meghaladó egységteljesítménnyel forgó alkatrész nélkül 45%-nál jobb hatásfokkal lehetséges a tüzelőanyag elégetése után keletkezett hőenergiát nagy sebességű ionizált gázáramban mágneses mező segítségével villamos energiává átalakítani. Ennek alapján az amerikai Westinghouse gyár — a negyvenes évek elején készített próbaberendezésen — megkezdte az első kísérleteket. Nehézségek jelentkeztek, mert a munkagáz megfelelő villamos vezetőképességet nem lehetett biztosítani. A későbbiek során a rakétatechnika

kifejlődése, a nagy hőmérséklettel szemben ellenálló anyagok bevezetése lehetővé tette világszerte az MHD kutatás újbóli megindítását. Ennek a kutatásnak élvonalába került napjainkban a Szovjetunió.

Dr. Halász Dénesnek az MHD generátor megalkotásában tett kezdeményezését világszerte elismerik. Ő egész élete végéig foglalkozott az MHD eljárás tökéletesítésével és javításával. Elgondolásait nemzetközi szimpoziumokon és tudományos konferenciákon közölte. A Magyar Tudományos Akadémia ezen a területen végzett tudományos munkásságát értékelve — figyelembe véve a villamosenergia-rendszerek felépítése területén elért eredményeit — 1954-ben a műszaki tudományok doktorává minősítette. A közvetlen energiaátalakítás más megoldásai is érdekelték, ezek között a hővillamos generátor, a termoionikus generátor műszaki javítására új megoldásokat jelentett be.

Műszaki eredményeit és tudományos munkásságát, amelyet élete végéig folytatott, sokra becsülték. Ennek alapján az Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület 1969-ben a Segner-díj aranyfokozatával tüntette ki.

Teremtő egyénisége és a műszaki kutatást szolgáló töretlen munkássága példaképe lehet az egész magyar műszaki társadalomnak.

Dr. Szendy Károly

Dr. Halász Dénes irodalmi munkássága

1. „Eljárás és berendezés áramlási energiának villamos energiává való átalakítására. Szabadalmi bejelentés 1936. (Karlovitz Bélával)
2. Die Wärmekraftmaschine hohen Wirkungsgrades Acta Techn. Hung. **27** (Karlovitz Bélával)
3. History of the KandH Generator and Conclusions Drawn from the Experimental Results. Engineering Aspects of Magnetohydrodynamics. *Proceedings of the third Symposium* Edited by Norman W. Mather and Leorge Lutton, March 1962. (Karlovitz Bélával)
4. Losses Caused by the Hall-Effect and their Influence on the Efficiency of the Thermal Cycle in MHD Generators. Acta Techn. Hung. **44.** (1963) 451. (Szendy Károllyal)
5. Medium Size Thermionic Generator *Acta Techn. Hung.* **48**, 126 (Szendy Károllyal)
6. Electron Emission in MHD Generators. *International Symposium on MHD Elektrical Generation.* OECD European Nuclear Energy Agency (Paris, 1964. júl. 6–11. 19a) 2a szekcióban. (Kovács K. Pállal és Szendy Károllyal)
7. Villamosenergia közvetlen termelésének új eljárásai. 4. fejezet, Magnetohidrodinamikus (MHD) villamos energia termelő rendszer *OMFB* 1–509–ET–1965, Elemző tanulmány.
8. MHD Power Plant with High Air Preheat. *7th Symposium on Engineering Aspects of Magnetohydrodynamics.* Princeton University USA, 1966. márc. (Szendy Károllyal)
9. High Grade Ionisation in Cold Gas, *8th Symposium on Engineering Aspects of Magnetohydrodynamics.* Stanford University, USA, 1967. márc. (Szendy Károllyal)
10. Improvement of Thermo-Electric Generator Efficiency by Partial Recuperation of Input Heat. *VII. Energia Világkonferencia* (1968), C_4 csoport, 173. dolgozat (Lukács Józseffel és Szendy Károllyal)
11. Improvement of the Process „High-Grade Ionization in Cold Gas" (Szendy Károllyal). Acta Techn. Hung. **68** (1970)
12. Increasing of Conductivity of Moderate Temperature Working Fluid in MHD Generator Channels (Szendy Károllyal) *Energia Világkonferencia, Bukarest*, 1971. június 28–júl. 2. 2. csoport, 2.5–52 dolgozat.

BESZÁMOLÓ A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK OSZTÁLYÁNAK 1970. ÉVI TEVÉKENYSÉGÉRŐL

BOGNÁR GÉZA
AKADÉMIKUS, OSZTÁLYTITKÁR

Az 1971. május 7-én tartott Nyilvános Osztályülés tárgya a Műszaki Tudományok Osztályának az elmúlt évi közgyűlés óta végzett munkájának megvilágítása. A jelen beszámoló Függelékében foglaltak ismeretét feltételezve, az alábbiak néhány szóban az Osztály munkájának fő irányait és az előttünk álló feladatokat foglalják össze.

Az Akadémiának az 1970. évi közgyűlésén elfogadott és akkor részletesen ismertetett átszervezése sok tekintetben megváltoztatta tevékenységünket. Az Osztály munkáját az eddigieknél nagyobb mértékben terjesztette ki a műszaki kutatás egész területére. Az új helyzetben arra törekedtünk, hogy figyelemmel kísérjük és értékeljük az egyes tudományterületek fejlődését, ennek alapján egy-egy szakterületen tudományos helyzetképeket, tudományfejlesztési koncepciókat, javaslatokat dolgozzunk ki és adjunk át a népgazdasági ágak fejlesztésére hivatott szerveknek. E munkánkban az a meggyőződés vezetett, hogy az Akadémia Műszaki Tudományok Osztályának mind nagyobb szerepet kell vállalnia az egész népgazdaság fejlődése szempontjából döntő jelentőségű tudományos kutatási területek munkájában, a tudományos problémák helyes orientálása és eredményes megoldása érdekében.

A Magyar Szocialista Munkáspárt 1969-ben közzétett tudománypolitikai irányelvei, az Akadémia átszervezése, az elmúlt évben megtartott X. pártkongresszus, egyértelműen arra hívták fel figyelmünket, hogy fejlődésünk jelenlegi szakaszában legfontosabb teendőnk a tudománynak az országépítés szolgálatába való állítása, népgazdasági szempontból való hatékonnyá tétele.

A tudományos-technikai forradalom kibontakozása, a szocialista tervgazdálkodás által nyújtott lehetőségek olyan előfeltételeket teremtenek számunkra, amelyek helyes felhasználása az Akadémiának, mint az ország legfelsőbb tudományos testületének, elsőrendű kötelessége.

Korunkban, amikor mind nagyobb mértékben mutatkozik meg a tudomány közvetlen termelőerővé válása, már nemcsak az egyes tudományos eredmények elérésére kell törekedni, hanem az egész termelés műszaki színvonalának növelésére kell az erőket összefogni. Éppen ezért a tudományos munkák hatékonyságának fokozása, a legfontosabb fejlődési irányok szolgá-

latába való állítása, különösen a műszaki tudományok tekintetében, a termelés közeli és távolabbi problémáinak megoldására való hasznosítása a feladatunk. A műszaki fizika, az elektronika, az energetika, a szabályozástechnika gyorsütemű fejlődése eredményeként kialakuló termelő ágazatok egyenletes fejlődése csak akkor biztosítható, ha kibontakozik a tudomány és a termelés olyan kapcsolata, amelyen keresztül a tudomány és a termelés kölcsönhatásba kerül és eredményeiket kölcsönösen alkalmazva, fejlődésük ütemét meghatványozzák.

Mindezek a ma már világosan megfogalmazható követelmények indították Osztályunkat arra, hogy tudományterületenként kijelöljük azokat a legfontosabb kutatási irányokat és feladatokat, amelyek a tudományt és a műszaki előrehaladást koordináltan szolgálhatják. Néhányat említve ezek közül utalunk a törésmechanikai kutatások fejlesztésére, az anyagkutatásokra, a könnyűszerkezetek fejlesztésére, a környezet és vizek tisztaságának megőrzésére, a matematikai módszereknek a termelésben való alkalmazására.

Több szakterületen az e munkához kapcsolódó megalapozó, iránytmutató feladatok kidolgozására munkacsoportokat hoztunk létre. A fémtani vizsgálatok és fémtani szerkezetek kutatási helyzetfeltárása, nagynyomáson és hőmérsékleten igénybevett anyagok és vizsgálati módszerek fejlesztése, a hazai és nemzetközi rugalmasságtani kutatások áttekintése, a városképvédelem, a hőenergiának közvetlenül villamos energiává való átalakítása, a reológiai kutatások, a technológia szerepe és jelentősége a hazai szigetelő és félvezető alapú integrált áramkörök kutatásában és gyártásában, a hazai felszíni vizek minőségének alakulása azok a témák, melyek vizsgálatát végzik a munkacsoportok. A kidolgozott javaslatokat az illetékes bizottság felülvizsgálata után fogjuk az alkalmazásra hivatottak rendelkezésére bocsájtani. Ezek, a lényegében kezdeti lépések alkalmasak arra, hogy az egyes tudományterületekért felelős bizottságok munkáját az eddigieknél nagyobb mértékben orientáljuk olyan tudományos kérdések, fejlődési irányok felé, amelyek az akadémiai, a tanszéki és az ipari kutatási munkák összehangolását, a tudományos kutatás konkrét befolyásolását szolgálják.

E törekvéseink szoros összhangban vannak a Kormány határozata alapján kidolgozás alatt álló 15-éves országos távlati tudományos kutatási tervvel. A terv, — az előzőtől eltérően — csak a legfontosabb és a legjelentősebb kapacitást lekötő, komplex kutatási feladatokat foglalja magában: megkülönböztetett kutatási főirányokat, melyek a távlati fejlődés tudományos megalapozását szolgálják és kutatási célprogramokat, melyek konkrét népgazdasági cél elérésére irányuló kutatási-fejlesztési feladatokat tartalmaznak.

Az egyes tárcák, főhatóságok kutatási főirányait és programjait a terv melléklete foglalja magában. Ezek az ágazati tervek egy-egy tárca területén működő kutatóhelyek által művelt feladatokat foglalnak magukban.

A műszaki tudományok területét érintő kutatási főirányok kezdeménye-

zésekor Osztályunk arra törekedett, hogy az ipari fejlesztéssel összefüggő, kutatást igénylő problémák kerüljenek előtérbe. Ennek megfelelően javasolta a szilárdtest kutatásoknak, a számítástechnikának, a könnyűszerkezetek fejlesztésének kutatási főirányokként való jelölését.

A javaslatok alapján kijelölt főirányok közül Osztályunk a számítástechnikai tematikai tartalmának kialakításában, majd a kidolgozott előzetes tervtanulmány mélyrehajtó megvitatásában vett részt a harmadik osztállyal tartott együttes ülésen. Most az a feladat áll előttünk, hogy a kidolgozott „Számítástechnika alkalmazásai" kutatási főirány tudományos tartalmát testületi szerveink megvitassák és kiegészítsék olyan javaslatokkal, amelyek annak eredményességét növelhetik.

A „Szilárdtestek kutatása" főirány keretében javasolt tudományos célkitűzések megvitatásában, szakértők bevonásával, osztálytagjaink résztvettek. A kialakított tervtanulmány bizottsági megtárgyalására a közeljövőben kerül sor.

Hangsúlyozandó, hogy a szóban forgó kutatási főirányok nem merevedhetnek meg. A tudomány és a népgazdaság fejlődése dinamikájának megfelelően módosulnak, kiegészülnek. Ezért nyilvánvaló, hogy a terv végrehajtása során az Osztálynak fontos feladata a tudomány fejlődésével lépést tartva, kellő időben felhívni a figyelmet azokra a tényezőkre, amelyek a kitűzött főirányba való következetes haladás érdekében új megoldásokra, új módszerek alkalmazására vezethetnek.

Az OMFB keretében szervezett Műszaki Kutatásokat Koordináló Tanács által tárgyalt célprogramok tudományos vonatkozásainak testületi véleményezésére eljárásban állapodtunk meg. Az egyes népgazdasági ágazatokat irányító rendes és tanácskozó jogú tagjainkat kértük fel, hogy jelöljék meg azokat az ágazati célprogramokat, amelyek tudományos vonatkozásaival bizottságaink foglalkozhatnak. Eddig a közlekedési tárca célprogramjait vitatta meg a Közlekedéstudományi Bizottság. A KGM, az ÉVM célprogramjai közül folyamatban van azoknak a kiválasztása, amelyeknél a tárca bizottsági segítségre is számít.

További fontos feladatunk a már jóváhagyott kutatási programok végrehajtása során olyan új kutatási irányokra való javaslattétel, amelyek kihatnak az egész programra. Szükség van tehát arra, hogy a hazai és nemzetközi tudományos fejlődés figyelemmel kísérésével bizottságaink tudományos prognózisokat dolgozzanak ki, amelyek egyrészt a távlati tervek végrehajtását segítik, másrészt új irányok, új célprogramok kialakítását kezdeményezik.

E feladatok mellett bizottságainknak figyelemmel kell kísérniök és segítniök kell a külföldi fejlesztési eredmények átvételét és felhasználását biztosító kutatásokat. Arra kell törekednünk, hogy az itthon vagy külföldön elért eredmények gyakorlati felhasználásra alkalmassá váljanak, és ezzel a műszaki haladás meggyorsítását segítsék elő.

Osztályunk további lépéseket tett a műszaki kutatásokért felelős OMFB-vel való kapcsolat további kiépítése, elmélyítése érdekében. A távlati terv kidolgozásával kapcsolatos már vázolt együttműködés az OMFB tanácskozó testületeiben való részvétel, az OMFB tudományos problémákat is érintő tanulmányainak véleményezése mellett arra törekszünk, hogy tudományos kutatási és fejlesztési programjainkról kölcsönösen tájékoztassuk egymást, és ezzel biztosítsuk a műszaki fejlesztés és a tudományos fejlődés összhangját. A már elért eredmények, mint pl. az OMFB-vel közös Energetikai Tudományos Bizottság alapítása, igazolják azt, hogy a szoros együttműködés feltételei biztosítottak.

A Műszaki Tudományok Osztálya eddigi munkájában is törekedett arra, hogy ténylegesen alkotó szakemberek részesüljenek tudományos minősítésben. Kezdeményezésünkre vált lehetővé az, hogy alkotások alapján is megadható a tudományos minősítés. Ebben az esetben a minősítés alapja maga az alkotás, ha az tudományos módszerek következetes alkalmazásának és felhasználásának eredménye, újdonság jellegével bír és elkészítése önálló alkotó tevékenységet igényel. Az eljárás megindításához írásban be kell mutatni az alkotás lényegét, annak gyakorlati hasznosítását. Az alkotás tudományos megalapozásának tézisei nyilvános vitára kerülnek. Ez a lehetőség is nyilvánvalóvá teszi a műszaki fejlődést szolgáló, tudományos eredményeken nyugvó alkotások megbecsülését.

Az Osztály munkájával kapcsolatban külön kiemelendő, hogy az Osztály tanácskozó tagjainak részvétele az osztályülések munkájában a műszaki tudományok és a népgazdasági ágazatok közötti kapcsolatok további elmélyítését szolgálja és segíti az Osztály munkáját abban, hogy tudományos tevékenysége a népgazdaságot szolgálja.

Kérjük a műszaki tudományok valamennyi művelőjét és a tudományos eredmények hasznosítására hivatott vezetőket, szakembereket, hogy az Osztály további munkájához adjanak hatékony segítséget.

FÜGGELÉK

AZ OSZTÁLYTITKÁRI BESZÁMOLÓHOZ

Az Osztály tevékenysége

Az Osztály beszámolója az 1970. évi közgyűlés óta eltelt időszakot öleli fel, a szakcsoportok, az akadémiai bizottságok működéséről, a könyv- és folyóiratkiadási tevékenységről.

Az elmúlt év elején tartott közgyűlés óta bekövetkezett jelentős események — felszabadulásunk 25 éves évfordulója, a harmadik 5 éves terv befejezése, Pártunk X. Kongresszusa, az Akadémia átszervezése — mind olyan társadalmi, politikai és tudományos tényezők voltak, amelyek az Osztály munkájában is visszatükröződnek.

Az Akadémia testületi tevékenységében a Párt X. Kongresszusa, annak határozatai folyamatosan érvényesülnek, a tudomány és termelés, a tudományos eredmények gyakorlati hasznosítása, a távlati kutatási tervezés, a központi kutatási célkitűzések kijelölése, a tudományszervezés minden területén. Megítélésünk szerint az Osztály testületi munkája a Kongresszus által megjelölt irányokban megtette a kezdő lépéseket, s mindinkább elősegítheti a műszaki tudományok szocialista társadalmunkat építő előrehaladását.

Az Osztályülés munkája

Az osztály munkájában az Akadémiáról szóló 1969. évi 41. sz. törvényerejű rendelet és az 1970. évi közgyűlés utáni új Alapszabály a korábbitól sok tekintetben eltérő rendet és eljárási módszereket alakított ki.

Az átszervezés óta az Osztályülés nagyobb szerepet kapott és átvette az előző szervezetben az osztályvezetőségre hárult feladatok egy részét is. Ezzel együttjáróan a szakcsoportvezetők együttes ülése oldja meg a szűkebb körben is elintézhető kérdéseket.

Osztályunk jelentősen tovább erősödött azzal, hogy az 1970. évi közgyűlés akadémikusainknak számát 3 fővel, a levelező tagok számát 4 fővel növelte és ezzel a Műszaki Tudományok Osztályának testülete 26 akadémikusból és levelező tagból áll.

Az Alapszabályokban foglalt lehetőséggel élve az Osztály tevékenységi körének kiszélesítése, valamint munkája hatékonyságának növelése érdekében 7 tanácskozó jogú tagot választott. A tanácskozó jogú tagok megválasztásánál az Osztályt az vezette, hogy a tudományos tevékenységéhez kapcsolódó népgazdasági ágazatok személyükben kiemelkedő, alkotó munkát végző képviselői osztályunkkal együttműködve segítsék elő a műszaki tudományok és a nép-

gazdasági ágazatok kapcsolatainak elmélyítését. Ezzel sikerült elérni azt, hogy a teljes jogú és a tanácskozó jogú tagok az Osztály tudományos területét elsősorban érintő tudományos és népgazdasági kérdéseket megfelelően megvitathassák.

A tanácskozó jogú tagok az osztály munkájába szívesen bekapcsolódtak és annak eredményességét elősegítik.

Az Osztályülés az elmúlt közgyűlés óta négy alkalommal ült össze. Tevékenységének súlypontját a közgyűlési határozatokból az osztályra háruló feladatok, az osztályhoz tartozó szakcsoportok, bizottságok újjászervezése, munkájának irányítása, a távlati tudományos kutatási terv osztályt érintő főirányainak kialakítása, az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottsággal való együttműködés elvi és módszertani problémáinak megvitatása képezte.

Két kérdésről, amelyek az elmúlt időszakban az Osztály tevékenységének homlokterében voltak, kissé részletesebben is szólni kell.

Az *egyik* az Országos Távlati Kutatási terv előkészítésébe való bekapcsolódásunk. Több kutatási főirány előzetes tervtanulmányának elkészítésében vettünk részt, egynek „A számítástechnikai módszerek, rendszerek, berendezések kutatása és fejlesztése" c. téma gondozását az Akadémia Testülete részéről a Műszaki Tudományok Osztálya látja el. Az előzetes tervtanulmány elkészítésébe a szakértők szélesebb körét vontuk be. Az anyagot később több akadémiai fórum megtárgyalta és végül az osztály a Matematikai és Fizikai Tudományok Osztályával együtt, összevont osztályülésen alakította ki állásfoglalását, amelyet eljuttattunk az Akadémia Főtitkárához.

A *másik* fontos feladatunknak az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottsággal való jó együttműködés szervezeti feltételeinek, kereteinek, módszereinek kialakítását tartottuk és tartjuk. Ezt a kérdéskomplexumot az osztályülés az OMFB felső vezetőivel együtt részletesen megvitatta és az együttműködés területeit kijelölte. Irányelvként mondotta ki azt, hogy az Osztály folyamatosan erősíti az együttműködést és intenzívebben törekszik közreműködni a népgazdasági célkitűzések tudományos feltételeinek megteremtésében és kialakításában. Elhatározta, hogy szakcsoportjai és bizottságai útján megvitatja azokat az OMFB tanulmányokat, amelyekben a javasolt műszaki fejlesztéssel párhuzamosan valamely tudományterület, vagy tudományos kérdés új irányokba való fejlődése várható vagy a kívánt cél eléréséhez nincs meg a kellő tudományos bázis, illetve ha ilyent kell szervezni.

A távlati tudományos kutatási terv kidolgozásával és végrehajtásával kapcsolatban azon központi és ágazati kutatási célprogramokat, amelyek közvetlenül kapcsolódnak valamely műszaki vagy alaptudományi területhez az OMFB és a tárcák az Akadémiával közösen dolgozzák ki és együttesen vegyenek részt a végrehajtásban.

Az Osztályelnök elhatározása szerint az egyes bizottságok véleményezik a részükre átadott ágazati célprogramokat is.

Az együttműködés egyik konkrét példájaként említendő a közös MTA—OMFB Energetikai tudományos bizottság létrehozására hozott osztályhatározat.

A szakcsoportok munkája

Az Osztály 6 évvel ezelőtt hozta létre a szakcsoportok rendszerét, elsősorban azzal a céllal, hogy a szakmailag egymáshoz közelálló tudományterületek képviselői érdemben foglalkozhassanak területük tudományos és tudománypolitikai kérdéseivel, irányításával és ellenőrzésével. A szakcsoportok működésük során jól összefogták tudományterületükön a tudománypolitikai, tudományszervezési és szakmai kérdéseket, eredményesen koordinálták a bizottságok munkáját, javaslataikat. A szakcsoportok átszervezése szükségességére csupán olyan szempontból került sor, hogy az egymással összefonódó, rokon tudományterületek egysége minél erősebben kidomborodjék. Ennek megfelelően az addigi négy szakcsoportot három szakcsoportba vonta össze az osztályülés. Belső szervezeti változtatásra annyiban került sor, hogy a szakcsoport akadémikus tagjain kívül a szakcsoporthoz tartozó bizottságok nem akadémikus elnökei az üléseken állandó meghívottként részt vesznek.

A szakcsoportok munkaterveiben a tudománypolitikai és szervezési feladatok ez évben szemmelláthatóan előtérbe kerültek. Részletesen megvitatták a Párt X. Kongresszusára kiadott irányelveket, észrevételeket és javaslatokat dolgoztak ki. A szakcsoportok igen sokrétűen foglalkoztak a párt tudománypolitikai irányelveiből fakadó tudományirányító, tudományos tervezési, szervezési feladatokkal, tudományterületük fejlődésének figyelemmel kísérésével. Az átszervezés óta nőtt a Szakcsoportok területén nem kevés adminisztrációs megterhelést is jelentő feladatok száma. Számottevő fejlődésnek tekintjük azt is, hogy a szakcsoportok vezetői az osztályelnök munkáját az osztályülések közötti időszakokban hathatósan segítik.

Az *Elektrotechnikai Tudományok Szakcsoportja* négy ülést tartott. Munkájának súlypontját az országos távlati tudományos kutatási terv főirányainak szakterületét illető kijelölése gondozása képezte. Ennek során új korszerű vizsgálatokat (milliomodrendű szennyezések vizsgálata, Nussbaum-effectus, speciális szakítószilárdságok stb.) javasolt. Irányítóan részt vett a számítástechnika és a szilárdtestfizikai kutatási főirányok kialakításában és tervtanulmányainak bírálatában. Jelentős szerepet vállalt az 1970 őszén megrendezett sikeres tudományos ülésszak programjának kidolgozásában, előkészítésében, különös tekintettel a témákhoz kapcsolódó társtudományos osztályok együttműködésére.

Figyelemmel kísérte a felügyelete alatt működő négy Bizottság munkáját, ezek előterjesztései alapján koordinálva állította össze a tudományszervezési tevékenységgel kapcsolatos javaslatokat.

A Gépészeti- Kohászati Tudományok Szakcsoportja hét ülést tartott. A tudományterületéhez tartozó bizottságok újjászervezése után, a kialakított munkaterveket felülvizsgálta, azokat részben módosította, új feladatokkal kiegészítette. Javaslatokat dolgozott ki a távlati tudományos kutatási terv kialakításával kapcsolatban a tudományterület legfontosabbnak ítélt kutatási kérdései tekintetében, kiemelve a hazai törésmechanikai kutatások fejlesztésének szükségességét. Megvitatta a távlati tudományos kutatási terv készítésével kapcsolatban a bizottságokra háruló feladatokat, s ennek alapján felkérte a bizottságokat arra, vizsgálják meg, hogy az alapozó kutatások hazai fejlődési irányai korszerűek-e, kellően illeszkednek-e a már kialakulóban levő országos és ágazati célprogramokhoz, majd kíséreljék meg az általuk fontosnak tartott kutatási irányok meghatározását.

Folyamatosan és hiánytalanul végrehajtotta az esedékes tudományszervezési feladatokat, megkezdte az 1971. évi IV. Korszerű Méretezési Konferencia szervezését.

A Mérnöki- Építészeti és Közlekedési Tudományok Szakcsoportja öt ülést tartott. Az osztályülés intencióinak megfelelően felülvizsgálta bizottsági hálózatát, Albizottságok és Munkabizottságok létesítését határozta el, a munkaterveket koordinálta.

A Szakcsoport a hazai mérnöki—építészeti—közlekedési tudományok egészséges fejlődését jelentősen elősegítő kérdéseket 8 témakörben foglalta össze, ezek kiemelt kezelését javasolva. Részletesen megvitatta a kiemelt akadémiai kutatási feladatokról és a távlati terv előkészítéséről szóló munkaanyagot és ezzel kapcsolatban javaslatokat tett. Ez alkalommal is rámutatott azokra a kutatási feladatokra, amelyek szakterülete szempontjából kiemelést indokolnak.

Javaslatot tett a könnyűszerkezetes építési mód és általában a hazai építőipar fő problémáinak együttes ülés keretében való tárgyalására, amely a korreferensek megvilágításával kiegészítve igen hasznosnak bizonyult.

Az Osztályhoz tartozó bizottságok

Az 1970. évi közgyűléssel az Osztályhoz tartozó tudományos bizottságok megbízása lejárt.

Az Alapszabályban foglaltak figyelembevételével, a szakcsoportok javaslatai alapján az Osztályülés felülvizsgálata után az Osztály 20 bizottságot szervezett újjá. Az Osztály általában csökkentette az albizottságok számát, inkább az egy-egy tudományos probléma kidolgozására, megvitatására szervezett munkabizottsági rendszer kiépítésére törekedett.

A bizottságok megalakulásuk óta általában aktívan működtek, átlag 3—5 ülést tartottak. Munkájukat a tudományszervezési feladatok mellett

mind több elvi tudományos kérdés megvitatására, a tudományterület fejlődésének áttekintésére és figyelemmel kísérésére összpontosították.

Külön ki kell emelni, hogy a bizottságok tevékenysége az átszervezés óta fokozatosan a tudományterület legfontosabb tudományos problémáinak megvitatására összpontosul. Ezt igen hatékonyan segíti elő az a lehetőség, hogy az Akadémia az egyes témák kidolgozására felkért bizottsági tagokkal, szakértőkkel szerződést köthet. A munka elvégzése után a bizottság vitája, értékelése alapján a kidolgozásban résztvettek tiszteletdíjban részesülnek. A bizottságokban jelenleg 16 téma kidolgozásán tevékenykednek ebben a szervezeti formában.

Az akadémiai Mechanikai Kutatások Intézőbizottsága tevékenységét közvetlenül az Osztályelnök alá rendelve végzi. Az Intézőbizottság legjelentősebb munkája volt, hogy sokoldalú tárgyalások után új részletes előterjesztést dolgozott ki az akadémiai mechanikai kutatások fejlesztésére. Ebben konkrét javaslatot tesz a hazai mechanikai kutatási bázis kiszélesítésére a Tudománypolitikai Irányelvek szellemében.A fejlesztés feltételei, jól a Budapesti Műszaki Egyetem területén megteremthetők. Figyelemmel kísérve a jelenlegi mechanika kutatások helyzetét, kijelölte azokat a témákat, amelyekből helyzetkép, illetve tudományos prognózis készítése szükséges.

Elektrotechnikai tudományok szakcsoportja

Az Automatizálási Bizottság rendszeresen tevékenykedett, munkáját a távlati tudományos kutatási terv keretébe felvenni javasolt Számítástechnikai módszerek, rendszerek, berendezések kutatása és fejlesztése c. kutatási főirány tartalmi, tematikai kérdéseinek vizsgálata, illetve a szakértők által a kidolgozott előzetes tervtanulmány sokoldalú megvitatására helyezte. Megvitatta az Automatizálási Kutató Intézet nemzetközi kapcsolatait, a Bizottság IFAC magyar nemzeti bizottsága tevékenységét. Áttekintette az OMFB automatizálással kapcsolatos célkitűzéseit, tevékenységét, tovább mélyítette az együttműködést.

Az Elektronikus Eszközök Bizottsága munkájának középpontjában a kutatási munkák és az ipar fejlődése szempontjából fontos tudományos kérdések, valamint a szilárdtest kutatás távlati programjának bírálata állott. Szoros kapcsolatot tartott fenn az OMFB-vel, a szakterületéhez tartozó kutató bázisokkal.

Áttekintette a technológia szerepét és jelentőségét a hazai szigetelő és félvezető alapú integrált áramkörök gyártásánál és kutatásánál, s ennek eredményeként szakértő bizottság létrehozását tartotta szükségesnek. Elemezte a Mikroelektronika c. KGST—OMFB tanulmányt, a hazai ipar fejlődése és a tudományos kutatási helyzet szempontjából. A szilárdtest kutatás távlati

tudományos kutatási tervéhez készült előzetes tervtanulmányt opponensek bevonásával megvitatta, állásfoglalásait az illetékes akadémiai fórumok részére összefoglalta.

Az Elektrotechnikai Bizottság megalakult, feladatául átfogó tudományos problémák kidolgozását és megvitatását tűzte. A fenti szempontok szerint kidolgozott munkaterv szerint a nagyteljesítményű generátorok testzárvédelme témakör megvitatása történt meg. A tudományszervezési feladatokat a Bizottság megbízásából rendszeresen az Intézőbizottság látta el. Két albizottsága a Közvetlen energiaátalakítási albizottság és a Fényforrások albizottság újjáalakítása megtörtént.

A Távközlési Rendszerek Bizottsága tevékenységének középpontjában szakterülete tudományos helyzetképeinek kidolgozása, megvitatása volt. Gondozásában elkészült a mikrohullámú összeköttetések, valamint a vezetékes távközlés tudományos helyzetképe, kidolgozás alatt áll a számítógéphálózatra, a hálózat- és információelméletre vonatkozó helyzetkép. Igen nagy érdeklődést váltott ki ez évben is a rendezésében lezajlott IV. mikrohullámú kollokvium. A rendszeres tudományszervezési feladatok hiánytalan ellátása mellett külön is foglalkozott munkamódszereinek fejlesztésével, az OMFB-vel való kapcsolat kiszélesítésével.

A gépészeti és kohászati tudományok szakcsoportja

Az Áramlás- és Hőtechnikai Bizottság munkája irányainak kijelölése, szervezése után megvitatta és kialakította a keverékek és nem newtoni folyadékok áramlástani tudományos helyzetképet, előkészítette a gőzturbinák fejlesztésével kapcsolatos helyzetkép vitáját is.

A Bizottság keretében 5 al-, ill. munkabizottság működik, amelyek az áramlástechnikai gépek hatásfokának javításával, a dieselmotorok optimalizációs kérdéseivel, az egyidejű hő- és anyagátadással, a pneumatikus és fluidizációs anyagmozgatás elméleti kérdéseivel, a nagy nyomáson és hőmérsékleten igénybe vett anyagok vizsgálati módszereivel foglalkoznak. A Bizottság tudományszervezési feladatait folyamatosan végezte.

Az *Elméleti Technológiai Bizottság* munkáját a tudományterületen követendő akadémiai irányok meghatározása képezte. Ezek: az alakítási szilárdság és súrlódás vizsgálata, a porbeles huzalokkal végzett hegesztés fizikája, a szerszám és anyag forgácsolásban meglevő kölcsönhatás vizsgálata, a nagysebességű alakító kísérletekkel előállítható nagyszilárdságú csavarok, alkatrészek vizsgálata. A témák kidolgozását a bizottság irányításával munkabizottságok folyamatosan végzik. A Bizottság javaslatot tett egy forgácsolhatóság vizsgálatával foglalkozó nemzetközi konferencia megrendezésére, erősítette kapcsolatait az OMFB-vel a tudományszervezési feladatokat ellátta.

A Fémszerkezettani Bizottság új bizottságként alakult. Tevékenységét elsősorban szakterülete kutatómunkájának megismerésére, megvitatására koncentrálta. Ennek érdekében egyik ülését a BME Villamosmérnöki Karának Anyagtechnológiai Tanszékén, a másikat a Csepeli Fémmű kutatólaboratóriumában, majd a következőt az NME Öntészeti Tanszékén tartotta. A tudományszervezési feladatokon kívül, tagjai útján részt vett más testületek — OMEKE, GTE-szakmába vágó tanácskozásainak rendezésében.

A *Gépszerkezettani Bizottság* arra törekedett, hogy a megszűnt KKAB bizottság munkáját is továbbvive új szemlélet értékelést teremtsen tudományos területe számára. Ennekszellemében megvizsgálta a gépszerkezettan művelésének és oktatásának hazai helyzetét, megvitatta a tervezői gyakorlat állásfoglalását a terhelés, a határállapot és a méretezési eljárás kérdésében, majd a gépszerkezetek szilárdsági méretezését időben változó terhelési esetekre. Tudományszervezési szempontból jelentős az IFTOMM (International Federation from Theorie of Machines and Mechanisms) Magyar Nemzeti Bizottságának megalakítása.

A *Hőenergetikai Bizottság* foglalkozott a téma területéhez tartozó tudományterületek, kutatóbázisok fejlődésének értékelésével. Egyes fontos tudományos kérdésekkel mint pl. az energetikai folyamatok hatásának vizsgálata a környezetre, a hőtechnikai folyamatok irányítástechnikai kérdései, a hazai gépgyártással szemben támasztott igények tekintettel a távlati energiakoncepcióra, munkabizottsági előkészítés után foglalkozik majd a bizottság.

A *Metallurgiai Bizottság* az alakuló ülését megtartotta.

A *Szál- és Rosttechnológiai Bizottság* a Könnyűipari Minisztérium felkérésére több jelentős textilipari területen megvalósítandó kutatási témát vitatott meg és alakította ki ezekkel kapcsolatban állásfoglalását. Hathatós segítségével és közreműködésével rendezte meg a soproni Egyetem a faforgácslap gyártás és felhasználás kérdéseiről tudományos ülésszakát. Helyszíni tanulmányozással tájékozódott a soproni Erdészeti és Faipari Egyetem Faipari Mérnök Karának tanszékein folyó kutatási munkákról, valamint a Bőripari Kutató Intézet munkájáról.

Mérnöki, Építészeti és Közlekedéstudományok Szakcsoport

Az *Elméleti Mechanikai Bizottság* megvitatta a rugalmasságtani kutatások, valamint a képlékenységtani kutatások nemzetközi és hazai helyzetét. Áttekintette a hazai mechanikai publikációkat s ezekből következtetéseket vont le, javaslatokat dolgozott ki. Több ülésen foglalkozott az ez évben megrendezendő mechanikai konferencia szervezésével, előkészítésével. A tudományszervezési feladatokat ellátta, a kért véleményeket, javaslatokat kialakította.

Az *Építészettörténeti és Elméleti Bizottság* megtárgyalta A népi műemlékek és védelmük c. munkát, foglalkozott a Ráckevei kastély helyreállításával, az

Építészeti Múzeum fejlődésével, a magyar építészettörténeti forráskiadványok előkészítésével, a nagy műemléki topográfiával, az Architektura könyvsorozattal. 1970 szeptember havában Diósgyőr—Sárospatak térségében kirándulással egybekötött ülést tartott, amelyen a bizottság tagjai több műemlékhelyreállítási munkát tekintettek meg és a helyreállítás tudományos problémáit vitatták meg.

A bizottság keretében 3 albizottság működik, amelyek a műemlékvédelem, az építészettörténet és az építészelmélet tudományágakat tevékenyen művelik.

Az *Építészettudományi Bizottság* ülésein számos átfogó, iránymutató témával foglalkozott. Az építészettudomány és a kibernetika témakör keretében a kibernetika felhasználásának lehetőségei vizsgálatát kezdte meg az építészettudományi kutatásokban és az építészeti tervezésben. Rendszerezte a lakás környezetével szemben támasztott komplex egészségügyi, pszichikai, szociológiai, esztétikai követelményeket. Kialakította az optimális ipari munkahelyi környezet épületfizikai, pszichofizikai és esztétikai feltételeit. Erősítette kapcsolatait az Építéstudományi Intézettel, az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottsággal.

A *Közlekedéstudományi Bizottság* egyik feladata a közlekedéstudományok helyzetképének megvitatása, a tárca és a kutató bázisok tudományos munkáinak figyelemmel kísérése volt. A Bizottság az elmúlt évben kiküldött szerkesztőbizottság összeállításában kidolgozott tudományos helyzetképet megvitatta, kiegészítette, majd elfogadta. A Közlekedési Múzeum munkáját a helyszínen tartott ülésen áttekintette, a további munkára útmutatásokat adott. A közlekedési tárca ágazati kutatási-fejlesztési célprogram tervezetének témaköreit áttekintette, javaslatokat adott ezek kiegészítésére, belső tartalmuk kialakítására.

A *Talaj- és Kőzetmechanikai Bizottság* megvitatta az Építéstudományi Intézetben végzett geotechnikai vonatkozású kutatási témákat, munkabizottságot alakított a geotechnikai kutatások összefogására, irányítására, javaslatok kidolgozására. Megkezdte az 1971. októberében tartandó IV. Budapesti Talajmechanikai és Alapozási Konferencia rendezésével kapcsolatos munkálatokat. Kiküldött munkabizottság útján végezte el az utóbbi években megjelent cikkek értékelését.

A *Tartószerkezetek Mechanikája Bizottság* sokrétűen vitatta a hazai és külföldi építési hibákat és baleseteket, számos értékes következtetést levonva a tervezés és kutatás számára. Elmélyülten megvizsgálta a valószínűségelméleti mechanika és ennek tartószerkezetek vizsgálata terén való alkalmazását. Egy munkabizottságot szervezett a vasbeton héjak törési elmélete szakterületen.

A *Településtudományi Bizottság* megtárgyalta az országos területfejlesztési politika fő célkitűzéseit és feladatait, a városépítés ökonómiai vetületei

témák programját, a VÁTERV-ben folyó településtudományi kutatások helyzetét, valamint a távlati településtudományi politikai irányelvek és a IV. 5 éves terv kutatási program kidolgozásának helyzetét. Véleményezte Budapest általános rendezési tervét, a Velencei tó és a Mátra—Bükk regionális rendezési tervét.

A *Vízgazdálkodástudományi Bizottság* megvizsgálta a vízépítési földmunkák tömörsége, a résfalak vízépítési alkalmazása, az entrofizáció vízminőségbefolyásoló hatása c. tudományos témákat. Az Országos Vízügyi Hivatal felkérésére behatóan több ülésen keresztül tárgyalt az OVH. Távlati Tudományos Kutatási Tervét és a hazai vízgazdálkodási kutatás helyzetét. Ez utóbbi témával kapcsolatban a bizottság felmérő munkát végzett 21 vízügyi kutatással, illetve azzal is foglalkozó intézménynél, valamint a vízügyi igazgatóságoknál.

Az ember és környezete c. akadémiai főirány kidolgozásával kapcsolatban több kutatási tervtanulmányra tett javaslatot. Négy állandó albizottsága működik, ezek több mint tíz tudományos témát dolgoznak fel.

Az Osztály rendezvényei

Az osztály a beszámolási időszakban tudományos tanácskozásokat rendezett.

A külföldi vendégek 6 alkalommal tartottak felolvasó ülést, 5 akadémiai székfoglaló megtartására került sor.

Tudományos tanácskozások

1970. április 21. és 24. között rendezték meg a *IV. Mikrohullámú Összeköttetések Kollokviumot* a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Tudományok Osztályának és a Híradástechnikai Tudományos Egyesületnek, valamint a Nemzetközi Rádió Tudományos UNIO (URSI) támogatásával.

E rendezvény folytatása volt az 1959-ben, 1962-ben és 1966-ban rendezett korábbi Mikrohullámú Összeköttetések Kollokviumoknak. A kollokvium a Mikrohullámú Összeköttetések speciális kérdéseinek megvitatásán kívül lehetőséget adott a korszerű elektronika információelméleti, hálózatelméleti, elektromágneses térelméleti alapkérdéseinek áttekintésére is.

A IV. Mikrohullámú Összeköttetések Kollokviumon 372 regisztrált résztvevő volt, ezek közül 184 magyar szakember. A megtartott előadások száma 133 volt, ezek közül 38-at tartottak magyar tudományos kutatók.

1971. február 4-én *egésznapos konferenciát* tartottunk a Magyar Urbanisztikai Társasággal közösen „A *városépítés és az építési technika kölcsönhatásai*" címmel. A konferencia magasszínvonalúan, az építésügyi és városfejlesztési

kormányzat vezetőinek, a megyei és városi tanácsi vezetőknek és a szakemberek széles körének érdeklődése mellett folyt le.

A tudományos ülésszak előadásai

Az Akadémia 1970. évi november havi tudományos ülésszakán az Osztály az alábbi vitaüléseket tartotta:

Lévai András: A műszaki fejlesztés soronkövetkező és távlati feladatai,
Benedikt Ottó: Az automatizálás hazai és nemzetközi helyzete.

Korreferens: *Szádai Rezső:* Hidraulikus és pneumatikus irányítási rendszerek szerepe a gépiparban.

Bölcskei Elemér: Matematikai valószínűségen alapuló méretezési módszerek,
Szabó János: Könnyűszerkezetek anyagai és mechanikája.

A Matematikai és Fizikai Tudományok Osztályával közös vitaüléseken az alábbi előadásokat tartottuk:

Szigeti György: A félvezető kutatás néhány perspektivikus kérdése,
Szép István: Az áramkör-integrálás elveinek és módszereinek fejlődési irányai,
Prohászka János: Fémek mechanikai tulajdonságainak várható fejlődése,
Stefán Mihály: Néhány iparilag fontos színesfém fizikájának időszerű kérdései,
Vámos Tibor: A digitális számológépek fejlődésével kapcsolatos műszaki tudományos problémák.

Az ember és környezete (bioszféra) témakör keretében:

Bogárdi János: A vízkészletek mennyiségi és minőségi változása az emberi beavatkozás folytán.
Perényi Imre: A környezetalakítás városépítési feltételei.

Felolvasó ülések

Dr. Edward Erdélyi a Colorado-i (USA) Egyetem professzora 1970. június hó 18-án tartott előadást „Mágneses terek nemlineáris heteropoláris forgógépekben" címmel.

R. Pélissier az Électricité de France műszaki igazgatója 1970. július 16-án tartott előadást „Túlfeszültségek terjedései kérdései nagyfeszültségű villamos hálózatokon" címmel.

Nicholas I. Hoff a Stanford University (USA) professzora 1970. szeptember 10-én tartotta előadását: „Rúd- és felületszerkezetek stabilitási kérdései" címmel.

V. V. Bolotyin a Moszkvai Energetikai Egyetem professzora 1970. szeptember 17-én tartotta előadását, „Mérnöki szerkezetek megbízhatósága" címmel.

A. Sawczuk a Lengyel Tudományos Akadémia lev. tagja 1970. október 5-én tartott előadást „Large Plastic Deformation of Shells" címmel.

Louis Armand a Francia Akadémia tagja 1971. március 8-án tartott előadást „A vasutak nemzetközi együttműködésének kérdései és különböző formái" címmel.

Együttes ülések

Együttes ülést két alkalommal rendezett az Osztály:

Szeptember 30-án *Csáki Frigyes* lev. tag „A számítástechnika szerepe a korszerű kutatásban" címmel tartott előadást, melynek korreferensei: *Kalmár László* akadémikus *Pál Lénárd* lev. tag és *Kornai János* a közgazdasági tudományok doktora voltak.

December 9-én *Szabó János* lev. tag előadása hangzott el „A hazai építőipar fejlődése és népgazdasági jelentősége" címmel. Korreferensei: *Friss István* akadémikus és *Perényi Imre* a műszaki tudományok doktora voltak.

Székfoglaló előadások

Csanádi György akadémikus: „A nemzetközi közlekedéspolitika elméleti és gyakorlati problémái" (1970. VI. 1.).

Prohászka János lev. tag: „Fémek mechanikai tulajdonságainak várható fejlődése" (1970. XI. 10.).

Szendy Károly lev. tag: „Erősáramú hálózattervezés fejlesztése és a magyar alaphálózat távlati fejlődése" (1970. XII. 14.).

Kézdi Árpád lev. tag: „A földnyomás kérdése talajfizikai megvilágításban" (1971. II. 17.).

Szabó János lev. tag: „Rúdszerkezetek állapotváltozási egyenlete" (1971. III. 17.).

Az osztály könyv- és a folyóiratkiadási tevékenysége

Könyvkiadási tevékenység

1970-ben az Osztály gondozásában összesen 10 mű jelent meg.

A művek közül 2 monográfia, 6 kézikönyv, 2 konferenciai kiadvány.

A megjelent könyvek szakterületi megoszlása: 3 az elektrotechnikai tudományok, 2 a gépészeti és kohászati tudományok, 5 a mérnöki, építészeti és közl. tudományok területéhez tartozó.

Az Osztály gondozásában megjelent művek a következők:

Proceedings on Soil Mechanics (szerk. Kézdi Árpád).
Magyar Műemlékvédelem 1967—1968 (szerk. Entz Géza).
Major Máté: Breuer Marcel (megj. Architektura sorozat).
Proceedings of the Fourth Colloquium on Microwave Communication I, II, III, IV, V. Budapest 21—24 April, 1970. (Ed. By: G. Bognár).
Vámos Ferenc: Lajta Béla.

Balsay István: A Siemens-Martin acélgyártás (megj. Vaskohászati enciklopédia 7/I. köt.).
Csáki Frigyes: Korszerű szabályozáselmélet. Nemlineáris, optimális és adaptív rendszerek.
Máthé Pál: Richard Neutra (megj. Architektura sorozat).
Vajda György: Szigetelések villamos erőterei.
Vámos Tibor: Nagy ipari folyamatok irányítása a számítógépes irányítás kezdő lépései.

Folyóiratkiadási tevékenység

Az Acta Technica és a Műszaki Tudomány szerkesztőségéhez 1970. év folyamán összesen 118 tanulmány érkezett be: ezekből 49 jelent meg az Acta Technicában és 31 a Műszaki Tudományban. Ezenkívül 19 könyvismertetést közölt az Acta Technica és 28 könyvismertetést a Műszaki Tudomány.

A tanulmányok többsége angol nyelven jelent meg, erősen csökken a német nyelven megjelenő cikkek száma és csak néhány tanulmány jelent meg orosz nyelven.

Kötetenként a cikkek az alábbiak szerint oszlottak meg:

Acta Technica

67/1—4 szám	12	tanulmány,	3	könyvismertetés	30 ív
68/1—2	19	”	4	”	15 ”
68/3—4	7	”	9	”	15 ”
69/1—2	11	”	3	”	15 ”
Összesen:	49	tanulmány,	19	könyvismertetés	75 ív

Műszaki Tudomány

42/3—4	11	tanulmány,	15	könyvismertetés	15 ív
43/1—2	10	”	13	”	15 ”
43/3—4	10	”			15 ”
Összesen:	31	tanulmány,	28	könyvismertetés	45 ív

A fenti 31 tanulmányon kívül fenti Műszaki Tudomány kötetekben közöltük az 1969. és 1970. évi közgyűlési osztálybeszámolókat is.

Építés- Építészettudomány

2. kötet 1—2 füzet	7	tanulmány	15 ív	
2. kötet 3—4 füzet	3*	”	15 ”	Sajtó alatt
Összesen:	10	tanulmány	30 ív.	

* Ezen füzetekben 3 tanulmány és egy bevezető építészettörténeti tanulmány jelenik meg. Utóbbi tanulmány a Pannónia c. építészettörténeti könyvet mutatja be.

HOZZÁSZÓLÁSOK

AZ OSZTÁLYTITKÁRI BESZÁMOLÓHOZ

SZÉCHY KÁROLY
AKADÉMIKUS

Osztályelnökünk beszámolója megjelölte a Műszaki Osztály fő feladatát. Ez az Elnökség határozatának értelmében elsősorban a népgazdasági szempontból fontos kutatások művelése és a kutatási eredmények hatékonyabbá tétele.

Miután BOGNÁR akadémikus osztályelnök beszámolójában összefoglalóan megemlítette a legfontosabb témákat a Műszaki Osztály területén, legyen szabad az Építési, Közlekedési és Mérnöki Szakcsoport részéről felmerülő problémákból kiragadnom néhány olyant, ahol az elméletnek a gyakorlattal való kapcsolata és a kutatásoknak a népgazdasági hasznosság szempontjából való fontossága nyilvánvaló.

Úgy gondolom, a kiragadott példák megmutatják, hogy a mi szakterületünkön milyen hatékonyan lehet támogatni a népgazdaság fejlődését a tudományos kutatások által.

Hogy az első ilyen klasszikusnak nevezhető példát ragadjam ki: mindnyájan jól emlékszünk a tavalyi katasztrofális árvizekre, amelyekkel kapcsolatban a tudományos kutatásnak rendkívül nagy szerepe van. Hogy a feladatok közül csak a legfontosabbakra mutassak rá: visszaemlékezünk arra a hősies küzdelemre, amely közel két hónapon át folyt a töltések biztonságának megmentése érdekében, és amely ismét előtérbe hozza a szivárgási problémáknak rendkívül fontos elméleti tanulmányozását, a szivárgással kapcsolatosan a töltésanyag-átázás fizikai és mechanikai problémáinak a tanulmányozását és természetesen ezzel kapcsolatban az átázással szemben alkalmazható eszközöknek a népgazdaság rendelkezésére bocsátását.

Ugyancsak a vízépítés területén maradva: az árvizek kérdéséhez szorosan kapcsolódik a hordalékmozgások kérdése, amely mozgások tudományos tanulmányozása nálunk BOGÁRDI akadémikus munkássága következtében igen előrehaladott stádiumban van, és nagy segítséget ad mind a folyószabályozási, mind pedig az árvízvédelmi kérdések tanulmányozása terén.

Legyen szabad megemlítenem most már a hozzám közelebb álló építéstudományok területéről két olyan tudományos irányzatot, amelynek bevezetése és messzemenő alkalmazása népgazdasági szempontból is rendkívül lényeges, amellett igen komoly tudományos felkészülést és apparátust kíván.

Ezek között az első a reológia, amely az egyes jelenségek, alakváltozások időbeli lefolyásának a tanulmányozását tekinti tulajdonképpeni tárgyának. A reológia jelentősége megmutatkozik például már az előbb említett fokozatos töltésátázás problémájában is, ami szintén időfüggvény, de megmutatkozik minden egyes tartószerkezet, elsősorban a heterogén építőanyagok viselkedésében.

A reológiának tudományos alapon való tanulmányozása világszerte erős fejlődésnek indult, és úgy érzem, hogy mi ezen a területen még egy kissé el vagyunk maradva. Itt említem meg, hogy ebből a szempontból lényeges volna az akadémiai mechanikai intézetnek mielőbbi megfelelő keretekbe való állítása, ahol ez a fontos kérdés megfelelően tanulmányozható és tovább vihető volna. Ez egyébként az Osztály kitűzött feladatai között is szerepel.

A másik ilyen téma, amely méretezési és rugalmasságtani szempontból is lényeges: a véges elemek módszerének bevezetése a feszültségállapotok tanulmányozására. A véges elemek módszerének alkalmazása már számos területen utat tört magának. Hazánkban is igen hasznos kezdeményezések vannak ezen a területen; különböző földalatti üregek körüli feszültségállapotok tanulmányozásában, a több rétegű talajok feszültségállapotának tanulmányozásában, de más tényleges tartószerkezetek viselkedésének tanulmányozásában is rendkívül hasznos segítséget nyújthat ez a módszer, amely szorosan kapcsolódik a számítógépek gyakorlati alkalmazásának problémáihoz, mert ennek az eljárásnak a gyakorlatban való felhasználását és értékesítését csakis számítógépekkel lehet megfelelő formában és megfelelő eredményességgel megvalósítani.

A véges elemek módszerével elvégezhető feladatoknál felmerül egy másik fontos irányzat, amely megint a tartószerkezetek területén jut egyre inkább érvényesülésre. Ez a valószínűségszámításnak a bevonulása nemcsak az építmények biztonságának a megítélésébe, ahol hazánkban már kétségkívül jelentős lépések történtek. A biztonsági tényezőnek valószínűségszámítás alapján való meghatározásában már komoly előrehaladást tapasztaltunk. Erről az Akadémia keretén belül az elmúlt ősszel egy ankét is zajlott le, ahol ennek a problémakörnek a fő kérdései előtérbe kerültek.

A biztonságnak a valószínűségszámítás alapján való megítéléséről szólva mindenekelőtt az anyagtulajdonságokban fellépő valószínűségek, a terhelésben fellépő valószínűségek, a feszültségekben, a tartószerkezetek viselkedésében fellépő valószínűségek, az élettartam, valamint a vállalható kockázat matematikai megfogalmazása az, ami fontos alapot ad ennek a rendkívül lényeges és a tartószerkezetek méretezése szempontjából döntő fontosságú kérdésnek a megítélésében.

Ehhez hozzákapcsolnám azt a problémát, amely elsősorban külföldön tör utat magának: ez a heterogén építőanyagok tulajdonságainak matematikai-statisztikai alapon való megfogalmazása. Ilyen heterogén anyag elsősorban a talaj, de ilyen a beton, sőt ilyen a fa is: tehát igen lényeges építőanyagok tulajdonságait tudjuk majd ennek a tudományágnak a kifejlesztése útján úgy meghatározni, hogy azok a gyakorlat számára könnyebben kezelhetők és egyértelmű választ adók lehessenek. Az ilyen matematikai-statisztikai alapon meghatározott halmaztulajdonságoknak a kiművelése tehát a mi területünkön rendkívül lényegesnek és fontosnak látszik.

Egy másik területre térve át: a városkép kérdése szintén szerepel az osztályelnöki beszámolóban. Ezt a szakcsoport részéről is előtérbe helyeztük. Ha megfigyeljük azt a rendkívül nagyarányú építési tevékenységet, amely világszerte, de nálunk is igen örvendetes módon megnyilvánul elsősorban a lakásépítés területén, akkor kétségkívül fennáll az a veszély, hogy a gyors munka során városképileg olyan tömböket alkotunk, amelyeket azután később már nehezen lehetne helyrehozni. Eleve foglalkozni kell tehát azokkal az alapproblémákkal, amelyeknek megoldása lehetővé teszi azt, hogy ne tegyük monotonná, egyhangúvá a városképet azáltal, hogy többé-kevésbé egyforma séma szerint készült nagy tömegű lakótömböket építünk fel.

Az illetékes szakbizottságok behatóan foglalkoznak ezzel a kérdéssel. Kétségtelenül nagy jelentőségű problémáról van itt szó, mert a városképen kívül ez nyilvánvalóan a belső közlekedési problémákkal is kapcsolatos, emellett ennek a kérdésnek a megoldása nyilván a népgazdaság részére is komoly támogatást, segítséget ad.

Ilyen fontos kutatások még az épületfizikai kutatások is, amely kutatásoknak számos megnyilvánulásával találkozunk. Hogy mást ne mondjak: az épületek külső burkolatának, homlokzatának megjelenésében mutatkozó hiányosságok is elsősorban épületfizikai kutatások alapján volnának elháríthatók, természetesen megfelelő anyagok kiválasztásával és az anyagok fizikai tulajdonságainak megfelelő alapossággal történő feltárása mellett.

A felmerülő témák közül csak néhányat igyekeztem kiragadni abból a szempontból, hogy megvilágítsam, milyen közvetlen kapcsolatban állnak mindezek a népgazdasággal, tehát milyen komoly hatékonyságuk van a népgazdaság fejlesztése szempontjából is.

Meg kell említenem egy-két kérdést azzal kapcsolatban is, hogy mindezen témáknak a művelése és kifejlesztése talán hatékonyabbá volna tehető, ehhez azonban az eddiginél is fokozottabb kooperációra volna szükség az akadémiai tanszéki kutatócsoportok és az érdekelt ipari tárcák között. Az érdekelt ipari tárcák közül — az építési kérdéseken keresztül — elsősorban az Építésügyi és Városfejlesztési Minisztérium ezeknek a témáknak a gyakorlati felhasználója, és bár megfelelő együttműködés áll fenn, mégis volna javítani való, elsősorban a kutatási eredményeknek a gyakorlatba való bevezetése tekintetében.

Már többször említettem, ha jól emlékszem, a naggyűlések alkalmával tartott osztályüléseken is elmondottam azt, hogy legalábbis a mi területünkön milyen nagy akadálya a kutatási eredmények gyakorlatba való bevezetésének az, hogy ezeknek a megvalósítását rendszerint komoly gazdasági feladatokkal megbízott vállalatoknak a keretébe kell utalni, amely vállalatoknak megadott tervük van, tervteljesítésük van, nyilván azt a tervet kell elsősorban teljesíteniük. Emiatt az úgynevezett nullszériának, tehát a kísérleti jellegű munkáknak a megvalósítása az ő szervezetükben nyilván munkakiesést jelent, a

jelenlegi általános munkaerőhiány mellett pedig külön egyéb nehézségeket is támaszt.

Rendkívül fontos volna tehát egy olyan kivitelező vállalatnak a megszervezése, amely a tervtől függetlenül kizárólag a tudományos kutatási eredményeknek a gyakorlatban való kipróbálására tudna koncentrálni, és ezeknek a kutatási eredményeknek a megvalósulását, a gyakorlatba való bevonulását hatékonyan elő tudná segíteni. Ismét hangsúlyozva ennek a fontosságát, kérjük az Építésügyi és Városfejlesztési Minisztériumot, hogy ezen a területen a lehetőséghez képest minél gyorsabban tegye meg a szükséges lépéseket.

A szakcsoport területén az együttműködés a közlekedési tárcával a legmintaszerűbb, ahol a tárca tudományos célkitűzéseit az akadémiai főbizottság, valamint az egyes tanszékek messzemenően tudják támogatni.

Talán azt lehet még hiányként felhozni, hogy ezek az akadémiai kutatócsoportok nem erősek, hanem éppen ellenkezőleg, rendkívül gyengék, a kutatói létszám rendkívül alacsony, tehát ennek a munkának a hatékonysága sem olyan, amint azt a kutatócsoportok is szeretnék, és amint nyilván a közlekedési tárca is igényelné és elvárná. Ebből a szempontból tehát elsősorban a kutatás intenzitásának az erősítése volna szükséges.

Az Országos Vízügyi Hivatallal való együttműködés mintaszerűnek nevezhető. Itt mind a tanszéki kutatómunka, mind pedig az Országos Vízügyi Hivataltól kapott egyes kutatási feladatoknak egyrészt a meghatározása, másrészt a kimunkálása és az ehhez nyújtott anyagi és személyi segítség is igen jónak mondható, és így ezen a területen az együttműködés is megfelelő eredményeket fog hozni.

CSANÁDI GYÖRGY
AKADÉMIKUS

A magam részéről teljes mértékben egyetértek az Osztály jelentésével és javaslataival, és különösképpen örömmel regisztrálom azt, amit Osztályelnökünk kiegészítőjében elmondott, nevezetesen a mindinkább szoros kapcsolatot az Osztály és a gazdasági élet között. Ebben a tekintetben is elsősorban rendkívül helyes és jó kezdeményezés az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottsággal való szervezett együttműködés.

Engedje meg a tisztelt Osztályülés, hogy két olyan kérdést vessek fel, amelyekkel kapcsolatban bizonyos hiányérzetem van.

Mi ez a két hiányérzet? Az első a következő. Egy pillanatig sem gondolok arra, hogy a távlati tudományos kutatási tervvel kapcsolatban a mi működésünket az Akadémia vagy különösen a Műszaki Osztály egy pillanatig is csorbítaná, hiszen domináns feladata az Akadémiának, hogy a távlati tudományos kutatási terv kialakításában döntő szerepet vállaljon, azután a terv végre-

hajtásában is integráló szerepet töltsön be — és ez nagyon helyes is —, mégis úgy érzem, hogy emellett nem elhanyagolható, sőt azt mondhatnám, hogy az Akadémia területén legalább olyan lényeges, az egész népgazdaság területén pedig talán még fontosabb a 15 éves távlati gazdasági fejlesztési terv, amelyről — úgy érzem — az Akadémián belül úgy vélekednek, hogy ezzel foglalkozni talán nem ildomos, vagy talán nem hozzánk tartozik, pedig ennek a két kérdésnek a szétválasztása teljesen lehetetlen.

Mi nem engedhetjük meg azt a luxust, hogy az Akadémia tudományos bázisa a mi egész fejlesztési tervünk kialakításában ne játssza azt a szerepet, amelyet — úgy érzem — a népgazdaság érdeke mindenképpen megkövetel.

Nekünk mindenképpen meg kell találnunk a módot arra, hogy az Akadémia megfelelő szervei igen nagy mértékben, döntően befolyásoló mértékben szerepeljenek magának a fejlesztési tervnek a kialakításában, és természetes, hogy a terv tudományos megalapozásában döntő szerepet vállaljon az Akadémia.

Ehhez kapcsolódik következő megjegyzésem. Én helyeslem, hogy mi tudományos fő célkitűzéseket alakítunk ki, és természetes, hogy bizonyos sorolásra szükség van, mégis, éppen előbbi gondolatmenetem folytatásaképpen — azt gondolom, hogy nekünk azért az alapvető feladatunk, hogy a távlati fejlesztési tervünknek megfelelő tudományos munkát végezzük el.

Azon legyen tehát a hangsúly, hogy az Akadémiának — amikor beleszól egyrészt fejlesztési tervünkbe, másrészt döntően beleszól kutatási tervünkbe — az legyen a feladata, hogy olyan tudományos munka történjék, és az egyes tudományágak fejlődése olyan mértékben növekedjék, amilyen mértékben a mi adott fejlesztési tervünk ezt megköveteli.

És ha a fejlesztés olyan tudományágakra vonatkozik, amelyek talán nincsenek itt elsőnek sorolva, akkor a népgazdasági érdek megköveteli, hogy azokban a tudományágakban is olyan domináns szerepe legyen a jövőben, a távlatban az Akadémiának, amilyen a fejlődés szempontjából megkövetelhető.

A másik kérdésre már egészen röviden akarok utalni, azonban úgy érzem, helyes, ha mi a nagygyűlésen ezt a problémát is felvetjük. Ez pedig a mi egész tudománypolitikánknak az a kérdése, hogy a tudományos intézmények együttműködése nem kielégítő.

Itt nem az akadémiai kutatóintézetekre gondolok elsősorban, hanem döntően az ágazati kutatóintézeteknek az egyetemekkel való együttműködésére, aminek a szervezeti megoldása — úgy érzem — nem megy előre olyan mértékben, mint ahogyan mi szeretnénk, és mint ahogy a probléma fontossága megkövetelné.

Több ízben felvetettem az Akadémia megfelelő fórumain is és máshol is, hogy mi nem engedhetjük meg magunknak népgazdasági szempontból azt a luxust sem, hogy azt a tudományos bázist, amelyet a mi műszaki egyetemeink képviselnek, leszűkítsük — egészen triviálisan mondva — az úgynevezett

KK-munkák elvégzésére. Ez csak egy adottság, egy anyagi szükségesség, de én annak örülnék, és azt hiszem, minden egyetemi oktató örülne annak, ha nem ez volna az az anyagi kiegészítés, amely mindenképpen megilleti az egyetemi dolgozókat, hanem olyan tudományos munkába kellene belevinni tudományos oktatóinkat, amely megint a népgazdaság fejlődése szempontjából szükséges.

Mi a közlekedési tárca és a Műszaki Egyetem megfelelő tanszékei közötti együttműködés előmozdítására olyan szervezetet szeretnénk felállítani — és mindent meg fogunk tenni azért, hogy ez sikerüljön —, amelynek munkája nemcsak abban áll, hogy a minisztérium egyes munkáinak a megrendelésében közreműködjön, hanem bizonyos mértékben felelősséget vállaljon az egész közlekedés fejlődéséért és a közlekedés fejlődését megalapozó tudományos bázisért.

Meg kell mondanom, hogy a jelenlegi gazdasági szabályozók mellett ennek a végrehajtása hallatlan mértékben megnehezül. Majdnem meg merném kockáztatni azt a kijelentést is, hogy a mai szabályozók szerint nem is lehet ezt megoldani, mert ma vagy az intézeteknél, vagy az egyetemeken anyagilag kimondottan háttérbe szorulnak azok, akik ebben a munkában biztosan nagyon hasznosan vehetnének részt.

Javaslom, hogy Műszaki Osztályunk, amelynek ez a kérdés igen élenjáró kérdése kell hogy legyen, egy bizottság kiküldésével vizsgálja meg azokat a konkrét nehézségeket, amelyek szabályozó-rendszerünk adottságai miatt nem engedik megoldani ezt az igen fontos kérdést, vagy legalábbis rendkívüli módon megnehezítik a megoldását. Azt hiszem, hogy azokkal, akik ezeket a gazdasági szabályozókat hozták, meg fogjuk tudni értetni, hogy ebből a szempontból nem helyesek ezek a szabályozók, és egészen biztos, hogy meg fogják ezeket változtatni.

LÉVAI ANDRÁS
LEVELEZŐ TAG

A felszólításnak megfelelően legyen szabad röviden néhány olyan témáról beszélnem, amelyek az Osztályhoz tartozó Áramlás- és Hőtechnikai Bizottság munkájával, de ezen túlmenőleg országos koordinációs feladatokkal függnek össze.

Azért szeretnék kiemelni ilyen koordinációs kérdéseket, mert úgy érzem, hogy az Osztálynak és általában az Akadémiának mint testületnek a feladatai a mostani átszervezés után — melynek tapasztalatait most kezdjük leszűrni — az új szervezeti felépítésben igen nagy mértékben az ország egészének kutatási áttekintéséből, a kutatások befolyásolásából és bizonyos mértékig annak a tudománypolitikai tevékenységnek a kialakításából adódnak, hogy ezeket a kutatásokat és az akadémia munkáját hogyan tudjuk összefüggésbe hozni az országos célprogramokkal és fő irányokkal.

Amennyiben fő irányokról van szó, ott egyszerű a dolog, mert azokba az Akadémia szakigazgatása és testületi szervei bizonyos mértékben be vannak vonva. A célprogramoknál már kissé nehezebb a dolog, de én azt hiszem — legalábbis az eddigi tapasztalat után —, hogy az Akadémia bizottságai, ha igénybe veszik az Osztályon dolgozó, az Osztály munkájába bevont tárcavezetők és tárcaképviselők segítségét, igen nagy mértékben kapcsolhatók ezekhez az országos vagy tárcaprogramokhoz is.

Legyen szabad ezt talán egy-két példával megvilágítanom. Az egyik ilyen példa nem konkrétan az Áramlás- és Hőtechnikai Bizottsághoz tartozik, hanem az Osztály feladata: az az együttműködési megállapodás, amelyről az írásos osztályelnöki beszámoló és a szóbeli beszámoló is említést tett.

Megállapodás történt az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság Elnökségével, hogy közös tudományos bizottságot hozunk létre, amelynek feladata a népgazdaság energiastruktúrájának a korszerűsítését elősegítő vizsgálatok koordinálása, ilyen vizsgálatok kezdeményezése és lefolytatása. Nem maga a bizottság fog távlati fejlesztéssel konkrétan foglalkozni, hanem előkészíti mindazokat a döntéseket, és alátámaszt olyan elképzeléseket, amelyek a helyes energiapolitika kialakítását célozzák.

Nézzünk konkrétan egy-két példát. A bizottság szervezésében különböző helyeken működő szervek vizsgálják majd az energetika tudományos, műszaki és gazdasági fejlődésének dinamikáját, korszerű operáció-kutatási módszerekkel. Azután prognosztikus módszerekkel igyekszik felmérni ez a bizottság az energiaigények alakulását.

Hangsúlyozom, a bizottság nem készít távlati energiatervet, ez nem a bizottság feladata, de a távlati tervhez hozzátartozik a különböző energiahordozók termelési, elosztási, szállítási, felhasználási, átalakítási optimalizálása, természetesen beleértve az importált energiahordozót, az atomenergiát. Ez a munka egyéb népgazdasági területekre is kiterjed, így az energetikai gépgyártás területére; ezen belül megemlíthető a villamossági iparban használható maximális gépnagyságok vizsgálata, a hálózatépítés és a kommunális és az ipari hőellátás kérdése.

Még egyszer hangsúlyozom; mindezt nem valami hivatali vagy hatósági feladatnak tekintjük, hanem a bizottság kizárólag az erre illetékesek munkájának koordinátora, vizsgálatok kezdeményezője, elkészült tanulmányoknak, dolgozatoknak magas szintű vitafóruma.

Ezek a feladatok természetesen az Akadémián belül több osztálynak a közreműködését és a Műszaki Osztályon belül több bizottságnak a közreműködését igénylik, úgyhogy itt a koordinálás az Akadémián belül is, de elsősorban az Akadémián kívül előtérbe kerül.

Most egy kissé szűkebb részterületet említek meg kizárólag példaképpen. Az Áramlás- és Hőtechnikai Bizottságnak van egy munka-albizottsága, amely a vegyipari gépekkel és szállítóberendezésekkel foglalkozik. Anélkül, hogy fel-

sorolnám azokat a fontos tudományos témákat, amelyekkel munkájukban foglalkoznak, csak azt említem meg, hogy a Kémiai Tudományok Osztályán is működik egy hasonló felépítésű, hasonló kérdésekkel foglalkozó munkabizottság. Természetes az, hogy miután megtaláltuk egymást, most javaslatot tettünk arra, és az illetékes bizottságvezetők meg is egyeztek abban, hogy a két bizottság közösen dolgozik tovább, és — határterületről lévén szó — a két akadémiai bizottság közösen fogja megtartani beszámolóját. Ilyen példák egyébként már a Műszaki Tudományok Osztályán belül is voltak, amennyiben például a gőzturbinák szakterületével az egyik bizottság kezdett részetesen foglalkozni, azonban beszámolóját már a társbizottsággal együtt tartotta meg.

Az országos tárcafeladatoknak az Akadémiával való megismertetése úgy történik, hogy a kidolgozott programokat vagy azoknak meghatározott részét közlik velünk vagy betekintésre átadják. Így a nálunk dolgozó dieselmotor-albizottság, amely eddig az országos programtól elvonatkoztatott kérdésekkel foglalkozott sikeresen, például diesel-körfolyamatok hatásfokával, amely anyagot az ipar át is tudott venni, újabban, néhány héttel ezelőtt megkapta a járműfejlesztési programot, és természetes, hogy további munkáját járműfejlesztési programból az illető munkabizottságra tartozó részekre fogja koncentrálni.

De más kezdeményezések is vannak, így például egy másik munka-albizottság a pneumatizációs anyagvontatás elvi kérdéseivel foglalkozik.

Csak megemlítem azokat a témákat, amelyek más iparágak országos programjába vagy tárcaprogramjába tartoznak.

Így például a fluidizációs alapjellemzők megállapítása alapvetően fontos kérdés olyan területen, mint a timföldgyártás, élelmiszerek szállítása, gyógyszerek szállítása, amelyek ágazati célprogramokat képeznek. Ezeken belül ez az említett munkabizottság tudományos részkérdések megoldását tűzi ki feladatául.

Vagy pedig szó esett itt a környezetvédelemről; ismerjük ennek jelentőségét. Ez a bizottság foglalkozik a szállított levegőnek a benne foglalt portól és egyéb szennyezésektől való megtisztításával, ennek tudományos alapjaival.

Szó esett a nagy nyomáson és hőmérsékleten igénybe vett anyagok vizsgálati problémáiról is, ami megint ilyen koordinációs téma, mert hiszen ez a téma nemcsak az energetikaelméletet, hanem például a vegyipari gépészetet is érinti. Ezen a területen elmaradásunk van.

További példák felsorolása helyett röviden kapcsolódni kívánok Csanádi akadémikus előbb elhangzott felszólalásához. Megemlítette azt — és ezzel teljes mértékben egyetértek —, hogy az egyetemeken levő tudományos kapacitások kihasználása a koncentrált nagy feladatok érdekében nem kielégítő. Ennek okait nagyon helyesen állapította meg.

Csanádi akadémikus javaslatot tett arra is, hogy egy ad hoc bizottság nézze meg, hogyan lehetne a gazdasági szabályozókat ilyen értelemben be-

folyásolni. Én ezzel egyetértek, azonban meg kell mondanom, kissé nehéznek tartom, hogy a gazdasági szabályozók átalakítása rövid időn belül lehetséges lenne, hiszen tudjuk azt, hogy az ilyen kérdések tehetetlenségi foka eléggé nagy.

Amellett, hogy ezt a vizsgálatot a magam részéről is támogatom, az az érzésem, hogy ha a tárcák részéről nagy volumenű, nagy áttekintést igénylő feladatokra adnak az egyetemeknek megbízásokat, az egész mai rendszerbe beiktatva, tehát az ipari megbízások rendszerébe beiktatva, akkor az egyetemek ennek nagyon örülnek. Ha szabad ilyen minőségemben is nyilatkoznom: az egyetemek nagyon szívesen veszik, ha a tanszékek nagy horderejű kérdésekre kapnak megbízást elaprózott vizsgálatok helyett. Itt olyan kooperációs feladatok adódnak, amelyekre az egyetemek készek.

Példaképpen azt említeném meg, hogy ilyen elképzelések már vannak és futnak is, például az Építésügyi és Városfejlesztési Minisztérium egy igen nagy horderejű, nagy volumenű és hosszú távra előremutató kérdést vizsgáltat meg egyetemi szinten, és az az érzésem, hogy ennek a hatékonysága megfelelő.

Persze olyan munkákra gondolok itt — Csanádi elvtárs is olyanokra gondolt —, amelyekben több tanszék, több kar, sőt több egyetem együttműködésére van szükség.

Legyen szabad az Akadémia plénuma előtt kijelentenem, hogy az egyetem kész ilyen munkák elvégzésére, örömmel vár ilyen megbízatásokat, és addig is, amíg a gazdasági szabályozókat ennek megfelelően fogják kialakítani, azt hiszem, a mai rendszerbe beillesztve is megtalálja a megfelelő megoldást.

Befejezésül és összefoglalásképpen azt szeretném hangsúlyozni, hogy a munkaszervezésben egyre inkább előtérbe kerülnek a határterületek. Ilyen szempontból is nagyon jelentős az egyetemek szerepe, ahol a határterületek természetesen mindig képviselve vannak különböző tanszékeken.

De saját munkánkban, az Osztály munkájában is döntő fontosságú az, hogy bizottságaink és a bizottságokon belül működő munka- és albizottságok felismerjék ezeket a határterületeket, és kezdeményezzenek. Ha ez meglesz, akkor — azt hiszem — az Akadémia és az illetékes tárcák között az a kooperáció, amely egyelőre nem minden tárcával megy zökkenőmentesen, megfelelő módon fog alakulni, egyre inkább élővé lesz, zökkenőmentessé fog válni, és így el fogjuk érni közös céljainknak a lehető leggyorsabb és leghatékonyabb teljesítését.

SZIGETI GYÖRGY
AKADÉMIKUS

Szeretnék néhány szót szólni arról a témáról, amely tulajdonképpen csak félig tartozik az Osztályhoz, és az utóbbi években a III. Osztállyal közös komplex bizottság felügyelete alatt kerül művelésre. Ez a szilárd testek kutatása.

Amint az osztályelnöki beszámolóban is hallottuk, az Akadémia javasolja ezt a témát kutatási fő irány gyanánt kitűzni.

Ez a téma — eltekintve egyes kisebb kutatóhelyektől, tanszékektől — főleg a Központi Fizikai Kutatóintézetben és az Akadémia Műszaki Fizikai Kutatóintézetében kerül művelésre. A témából azt, ami a Központi Fizikai Kutatóintézetben folyik — egyrészt a mágneses jelenségek kutatása, másrészt a híg ötvözetekkel kapcsolatos kutatások —, azt hiszem, inkább a III. Osztály ülésén fogják majd tárgyalni.

A témának igen nagy ipari jelentősége is van, s az akadémiai intézetben művelt téma szorosan kapcsolódik az iparban folyó termelő tevékenységhez és az ipari kutatóintézetek, különösképpen a Híradástechnikai Kutatóintézet és a Távközlési Kutatóintézet munkájához.

Szeretnék néhány szót szólni arról, hogy ennek a témának egyik részére a Műszaki Fizikai Kutató Intézet szerződést kötött az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottsággal. Ennek a szerződésnek a keretében már körülbelül két és fél éve folyik a munka, és az eredmények eléggé bíztatóknak látszanak. A félvezető rétegszerkezeteknek a kutatásáról van szó. A rétegszerkezetek vizsgálata több irányba nyúlik. Egyrészt tudományos betekintést ad a félvezető eszközök működésébe, másrészt pedig ezeknek az eredményeknek az alkalmazása új eszközök kidolgozását teszi lehetővé, és a meglevő eszközök működésének a sebességét lesz hivatva növelni.

A félvezető rétegszerkezetek kutatásában a következő alkalmazási területek jöhetnek számításba. Az első — mint említettem — a működési sebesség növelésére irányuló kutatás. Másodszor: eddigi eredményeink máris lehetővé teszik új technológiák kidolgozását és új anyagok alkalmazását, illetőleg a meglevő anyagoknak új területen való felhasználását tudjuk már az eddigi kutatás eredményeképpen megvalósítani, és ezt a jövő évi munkánkban tovább kívánjuk folytani. A harmadik, ettől az első kettőtől különváló terület az úgynevezett optoelektronikai eszközök kidolgozása. Ez a kutatás egyrészt a félvezetőkben gerjesztett fénynek a felhasználását teszi lehetővé információközlésre nagyobb távolságokra, másrészt pedig magukban az eszközökben a huzalozásnak vagy az integrált áramkörökben a vezetőösszekötéseknek a megtakarítására vagy egyszerűsítésére nyújt lehetőséget.

Ezen a területen a munkát tovább kívánjuk folytatni, és valószínűleg komoly haladás várható a következő években. Az integrált áramkörök továbbfejlesztéséhez a rétegszerkezetek kutatása során elért eredmények valószínűleg szintén hasznosak lesznek.

A szilárd testek fizikája terén végzett kutatás az iparral való igen szoros együttműködést is involválja. Ez a múltban már szerződéses kapcsolatot jelentett, és azt tervezzük, hogy a jövőben is az iparral együttműködve tudjuk tovább vinni a kutatásokat. A jövőben nagyobb súlyt szeretnénk helyezni az eredményátadásra, amit, ha külföldi céggel kapcsolatos, licenciavásárlás

vagy licenciaadás néven szoktunk emlegetni. Ilyen tekintetben az intézet már szintén végzett eredményes munkát. Néhány szabadalmát az ipar át is vette, és ez az intézet bevételeit nem elhanyagolható módon növelte.

Ugyanakkor természetesen az ipar számára is rendkívül hasznosak voltak azok az eredmények, amelyeket egyrészt a félvezetők kutatása terén, másrészt a fényforrások kutatása terén, főleg a wolframkutatás terén az intézet végzett.

Az utóbbi területen az az iskola működik tovább, amelyet sok évtizeddel ezelőtt MILLNER Tivadar kezdeményezett, akinek nemzetközi tekintélye ma már kétségbevonhatatlan, a legnagyobb külföldi cégek és kutatóintézetek is elismeréssel nyilatkoznak róla, és együttműködést ajánlanak fel ezen a területen.

A leglényegesebb dolog azonban, amire rá szeretnénk mutatni, és amelyet szeretném, ha az Osztály is figyelembe venne más területen is, de a mi területünkön különösképpen, a szabadalmakkal kapcsolatos tényked és.

LENGYEL Béla akadémikus vezetésével működik az Akadémia találmányi albizottsága, amely ezt a kérdést igen nagy gonddal és buzgalommal viszi tovább, azonban a jelenlegi rendelkezések — bár a feltaláló részére biztosítják a kellő elismerést és honorálást — még nem teszik az intézetek számára olyan alapvetően fontos tevékenységgé ezt a tényked st, amint megérdemelné. Az intézetek által kidolgozott szabadalmakból származó tiszta bevételnek ugyanis 70%-át le kell fizetni adó formájában, tehát az intézeteknek csak igen jelentéktelen összeg marad a szabadalmak értékesítéséből származó bevételből, holott célszerű volna, ha az intézetek ilyen irányú tevékenységét sokkal energikusabban és anyagilag hathatósabban lehetne buzdítani.

Itt tehát — az Osztálynak olyan irányú állásfoglalása volna célszerű, ami egyezik az Akadémia találmányi albizottságának véleményével is —, hogy amikor erre sor kerülhet, lehetőség szerint módosítják a rendeletnek ezt a hiányosságát.

A rétegszerkezetekkel kapcsolatban az Akadémia Műszaki Tudományok Osztálya egy nemzetközi konferenciát rendezett. Ez a konferencia 1970 októberében körülbelül 300 részvevővel zajlott le. 150-nél több előadás hangzott el. Az előadók között szerepeltek a külföldi vezető laboratóriumok képviselői. Így például előadást tartott BOYLE, a Bell-laboratórium igazgatója, a Philips-laboratóriumtól OPDORP, a Siemens-laboratóriumtól WEISS, az RCA-laboratóriumtól FISCHER, szovjet részről ALFEROV és RZSANOV, ezenkívül számos más kiváló külföldi szakember. A konferenciáról a nemzetközi sajtóban, például az IEEE közleményeiben ismertető jelent meg, ahol nagyon komolyan méltatták a konferencia munkáját.

A konferencia a mi számunkra is rendkívül tanulságos volt, mert részben az ott elhangzottak alapján, részben az irodalom és saját kísérleteink alapján tudtunk megfelelő objektivitással részt venni az előttünk álló prognosztikon és a fő irányvonal kidolgozásában, és tudtunk elfoglalni olyan álláspontot, amely a további fejlődés valószínű irányvonalába fog esni.

EISLER JÁNOS
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK DOKTORA

Három megjegyzést, illetőleg részben javaslatot szeretnék tenni. Az első észrevételem az, hogy a távlati terv kidolgozásával kapcsolatban nagyon sok olyan hasznos dolog merült fel, amely azután különböző okokból nem került bele a tervbe. Az eddig összehozott anyagot részben mások: vállalatok, intézmények, részben mi magunk is esetleg hasznosítani tudnánk idővel az országos tervben. Ennek a vitaanyagnak nyilvánosságot kellene biztosítani, mert a vita során nagyon hasznos javaslatok hangzottak el.

Második javaslatom közép-jellegű közlemények kiadására irányul. A jelenlegi közlemények sorában „maxi" is van, ez a könyv, „mini" is van, ez a cikk, de a „midi", a hosszabb tanulmány hiányzik. Ilyen jellegű közlemény jóformán minden országban van; célszerű lenne nálunk is.

Harmadik javaslatom a tervekkel kapcsolatos. Jó lenne, ha a tervek végrehajtásakor folyamatos ellenőrzés történnék. Mindenesetre helyes volna menet közben megnézni, hogy abban a szellemben és úgy megy-e előre a dolog, ahogyan azt a terv készítésekor elképzeltük.

És még egy utolsó megjegyzés: ne csak azzal törődjünk, amit még nem tudunk csinálni, más sem tud csinálni, és nem vagyunk biztosak benne, hogy majd tudunk-e egyáltalán csinálni, hanem azzal is törődjünk, hogy amit egyszer már tudunk jól csinálni, azt továbbra is jól csináljuk, esetleg még jobban csináljuk.

KOVÁCS KÁROLY PÁL
AKADÉMIKUS

Magam is egyetértek az Osztály beszámolójával, azonban fel szeretném hívni a figyelmet a Magyar Tudományos Akadémia szerepére az oktatásban. Messzemenően egyetértek azzal a megállapítással, hogy a Magyar Tudományos Akadémiának tulajdonképpen már az elemi iskolától kezdve kellene végigkísérnie az oktatás elvi kérdéseit és azt, hogy milyen arányban legyen az lexikális tudás és milyen arányban alapozza meg a gondolkodásra való nevelést, a gondolkodási készséget.

A műszaki felsőoktatás kérdésében, beleértve a műszaki főiskolákat is és nem utolsósorban a műszaki egyetemeket is.

Legyen szabad egy javaslattal élnem. Javaslom, hogy a Műszaki Tudományok Osztálya foglalkozzék rendszeresen az oktatás kérdéseivel is. Hogy ez milyen formák és keretek között történik, azt hiszem, az másodlagos kérdés.

Egy másik kérdés, amelyet érinteni akarok, a következő. A Műszaki Tudományok Osztályához nagyon sokan tartoznak, akik a Műszaki tudományok különféle területein dolgoznak, de az Akadémia testület, és az akadémiai testületet mégis az akadémiai tagok alkotják. Ilyen szempontból nagyon lényeges dolognak tartom, és igényt is tartok arra — talán nemcsak a magam nevében —, hogy részleteiben is kellően informálva legyünk azokról a tervek-

ről, amelyekről itt szó van. Azt hiszem, bizalommal lehet az Akadémia vezetősége vagy az osztályvezetőség az akadémiai tagok iránt olyan értelemben, hogy a tagok választására bízzák azt, hogy azután melyik kérdéshez kívánnak aktívan hozzászólni, melyik kérdésben akarnak intenzíven részt venni bizonyos bizottságok ülésein.

Sokat hallottunk az energiabizottságról. Én magam is energiával foglalkoztam hosszú évtizedeken keresztül, de nem tudok semmit erről a bizottságról azon túl, amit itt hallottunk. Ebből azért valahogy az következik, hogy ez a szervezet talán nincs egészen jól organizálva.

JÁNDY GÉZA
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK DOKTORA

Sokat beszélünk arról, hogy a természettudományok, társadalomtudományok, műszaki tudományok között a tudósok együttműködését szorgalmazzuk. Kifejlődnek olyan határterületek, amelyek másképp nem is létezhetnek. Viszont ezek a határterületek sokszor nem találják meg a helyüket és így még lehetőség van arra, hogy kisebb igénnyel is elfogadásra kerülhessenek disszertációk.

Ilyen terület a rendszerelmélet, a szervezéselmélet, az operációkutatás, az információs rendszertervezés területe, amely vitatható, hogy hova tartozik. Remény van arra, hogy a következő bizottságalapító közgyűlésen rendezésre kerül ez a kérdés, de addig is van még két év, úgyhogy talán addig is érdemes volna valamit tenni ilyen vonatkozásban.

Meg kívánom jegyezni, hogy szerintem ez a terület elsősorban mérnöki szakterület, a legtöbb országban a képzés is elsősorban a mérnökképzéshez kapcsolódik. Ebben a nehéz helyzetben, ahol eléggé erős fal választja el egymástól az osztályokat, a természettudományokat, a társadalomtudományoktól — jóllehet ez a fal egyre több ponton leomlik, mert egyre több nagyon szoros érintkezési területe keletkezik a temészettudományoknak és a társadalomtudományoknak —, jó volna, ha ez az új tudományterület, amelyről beszéltem, a Műszaki Tudományok Osztályán kapna elhelyezést.

VÁLASZ AZ ELHANGZOTT FELSZÓLALÁSOKRA

BOGNÁR GÉZA
AKADÉMIKUS

Csanádi akadémikus olyan javaslatot tett, amellyel egyetértek. Javaslom a nyílt osztályülésnek, hogy fogadja azt el, és az Akadémia zárt ülésén, mint lehetséges fórumon Csanádi akadémikusnak adjunk megbízást arra, hogy az ő dinamizmusával, személyes tekintélyével terjessze elő az általa képvsielt javaslatot.

Amit EISLER János doktor javasolt, az rendkívül fontos, és nagyon érezzük a hiányát. Csak egy dolgot szeretnék hozzátenni. A realizálásban és a technikai előállításban valami nagyon gyors eljárást kellene kitalálni és megvalósítani, ami még növelné az értékét. Én néhány tudományterület képviselőjét, köztük EISLER Jánost szeretném ez ügyben összefogni, hogy konkrét javaslatot dolgozzanak ki.

Messzemenően egyetértek azzal, amit a távlati tudományos terv anyagával kapcsolatban mondott, és azzal is, hogy a tervellenőrzés menet közben történjék meg, hiszen ez a sikeres tervteljesítésnek előfeltétele.

KOVÁCS Károly Pál akadémikus informáltságának hiánya nyilván onnan származik, hogy ő személyesen nem vett részt azon az osztályülésen, amikor bejelentettük ennek a bizottságnak a létrehozását. Másik megjegyzésem pedig az, hogy ennek a bizottságnak a tagjai még nincsenek kijelölve. SEBESTYÉN Jánossal, az OMFB alelnökével egy elvi megállapodást írtunk alá, a bizottság megalakulására ezután fog sor kerülni, és amennyire én erről tájékozva vagyok, KOVÁCS Károly Pált a bizottság tagjai közé kívánják felkérni.

Indokoltnak tartjuk azt, hogy az Osztály foglalkozzék a műszaki egyetemi oktatás kérdésével.

JÁNDY Géza doktor beszélt arról a falról, amely az egyes osztályok és tudományterületek között van. Éppen az általa képviselt szakterület, a rendszerelmélet, az operációkutatás az, ami hivatva van — legalábbis bizonyos vonatkozásban — áttörni a falakat.

Ha a műszaki tudományok rohamos fejlődését és az elért eredményeket nézzük, akkor megállapíthatjuk, hogy minden tudomány és köztük a műszaki tudomány is nagyon sokat tett az emberiség jobb életéért. De ha előrenézünk — és sok szempontból erről volt szó a mai osztályülésen — akkor ijesztően sok és nagy feladat áll még előttünk.

Ezeknek a feladatoknak az elvégzéséhez kérem az osztályülés minden részvevőjének hatékony segítségét és közreműködését.

LINEÁRIS SZABÁLYOZÁSOK OPTIMÁLIS SZINTÉZISE DIGITÁLIS SZÁMÍTÓGÉPEN

I. RÉSZ

CSÁKI FRIGYES*
az MTA levelező tagja
KEVICZKY LÁSZLÓ** — KOVÁCS TIVADAR***

[Beérkezett: 1970. január 20-án]

Jelen cikkben egy olyan ALGOL programrendszer kerül ismertetésre, mellyel végrehajtható a lineáris szabályozási rendszerek optimális szintézise a négyzetes integrálkritérium alapján.

Bevezetés

Az állandó, koncentrált paraméterű valamint a holtidős tagokat tartalmazó egyváltozós lineáris szabályozási rendszerekben determinisztikus jelekre létrejött válaszfüggvények optimális lefolyását biztosító rendszerparaméterek meghatározására nagyon kézenfekvőnek látszik a korszerű digitális számológépek felhasználása.

A megoldáshoz szükséges numerikus módszerek — itt utalunk a lineáris egyenletrendszerek megoldására, határozott integrálok kiszámítására, többváltozós függvények lokális szélső értékének megkeresésére stb. — jól ismertnek tekinthetők. Így érdekes az a körülmény, hogy tudomásunk szerint e szakirodalomból hiányzik egy olyan egységes programcsalád széles körű ismertetése, mely a felvetett feladatnak megfelel.

Ezt pótlandó, jelen cikkünkben olyan ALGOL-programcsaládot kívánunk ismertetni, amelynek segítségével végrehajtható a lineáris szabályozási körök optimális szintézise valamely jel tranziens lefolyására jellemző integrálnak minimumra állítása alapján (integrálkritérium).

A tárgyalásunk során röviden kitérünk az elkészült programok elméleti alapjaira, felhasználási területükre és az alkalmazásuknál fellépő korlátozásokra.

1. ALGOL — eljárások a négyzetes integrálkritériumok számítására

Az állandó paraméterű, lineáris szabályozási körök legismertebb — ma már klasszikussá váló — tervezési módszerei általában a frekvencia és komplex operátoros tartományt használják fel. Ezek lassan eljutnak a lezártság álla-

* Dr. Csáki Frigyes, Budapest, V., Váci u. 8.
** Dr. Kevicky László, Budapest, VII., Damjanich u. 25/a.
*** Kovács Tivadar, Budapest, XI., Stoczek u. 17/b.

potához, különösen abból a szempontból, hogy a számítógépes technika elterjedésével az említett tartományokra való áttérés (L-, Z- és F-transzformáció) valamint a visszatérés (az előbbiek inverze) viszonylag gyorsan végrehajtható. Ezen módszerek talán egyik legnagyobb problémája, hogy a lineáris szabályozásokra általánosan elfogadott optimalitási követelményt, azaz a minimális túllendülést és minimális szabályozási időt, igen nehéz az ω vagy s tartományban megfogalmazni. Így az egyes paraméterváltoztatások hatását is csak közvetve, az időfüggvény értékelése után kaphatjuk meg.

Célszerűnek látszik a tranziens szabályozási folyamatokra vonatkozó többé-kevésbé ellentmondó követelményeket közvetlenül az időtartománybeli viselkedés alapján optimálisan kiegyenlíteni. A kompromisszumot (többek között) az integrálkritériumok segítségével valósíthatjuk meg. [1, 2, 4]

Valamely integrálkritériumot kiértékelhetünk:

a) a rendszer analóg vagy digitális szimulációjával valamint

b) a frekvenciatartományra vonatkozó összefüggések segítségével.

A rendszernek analóg-számológépes szimulációjakor még tervezett kísérletek segítségével is igen nehézkes és hosszadalmas az optimális feltételek beállítása. Csak kevés változóra alkalmazható.

A digitális szimuláció megvalósítható egy eléggé általános modell programozásával vagy pedig a rendszer differenciálegyenletének lépésenkénti megoldásával. [8]

Mivel egy jól működő szimulációs programrendszer kidolgozása maga is komoly feladat, ezért az integrálkritériumok kiértékelésére a frekvencia tartományban illetőleg a komplex operátoros tartományban érvényes összefüggéseket választottunk.

Optimálisnak nevezünk egy dinamikus szabályozási folyamatot, ha egy általunk megválasztott integrál (funkcionál) minimumot ér el. Az integrálkritérium általános alakja:

$$I = \int_0^\infty F(x(t), t)\, dt = \min. \tag{1.1}$$

Itt F bizonyos kétváltozós függvényét jelenti a t időnek és egy alkalmasan megválasztott $x(t)$ jelnek. Az integrálandó függvényt úgy kell megválasztani, hogy egyrészt a tranziens folyamat minőségét megfelelően jellemezze, másrészt viszonylag egyszerű alakú legyen és a rendszer-paraméterekkel való kapcsolatát lehetőleg egyszerű formában fejezze ki. A felsoroltak többé-kevésbé ellentmondó igények. Így nem hat meglepetésként, ha a szakirodalomban a legkülönbözőbb alakú integrálkritériumokkal találkozunk [1—7].

Míg a lineáris kritériumok elsősorban aperiodikus folyamatok értékelésére használhatók, a kvadratikus integrálkritériumok akár aperiodikus, akár lengő folyamatok vizsgálatához felhasználhatók [1, 4, 7]. A legkézenfekvőbb kritériumok az abszolút értékekre vonatkozó integrálkritériumok lennének,

amelyek mind az aperiodikus, mind a túllendülő folyamatok értékelésére használhatók. Mivel az abszolút értékek matematikai kezelése nehézkes, ezért inkább a négyzetes kritériumokat szokták a matematikai elemzésekben felhasználni. Az analóg számológépen azonban nem nehéz az abszolút érték kritériuma alapján vizsgálni a szabályozási rendszert.

Az optimalizálási probléma megoldásakor a szabályozási rendszer átmeneti függvényeiből, vagyis az időtartománybeli viselkedésből célszerű kiindulni. Fel kell azonban hívni a figyelmet az időtartomány és a frekvenciatartomány viszonylag szoros kapcsolatára. Lényeges a tervezés szempontjából, hogy milyen összefüggés mutatkozik egy bizonyos integrálkritérium és az átviteli függvény paraméterei (például együtthatói vagy időállandói, átviteli tényezője) között. Ennek a problémának az ad jelentőséget, hogy rendszerint a frekvencia — (vagy komplex operátoros) tartományban vannak megadva a szabályozási rendszer összefüggései és paraméterei.

Optimalitási kritériumként mi a négyzetes integrálkritériumot (a továbbiakban ISE: Integral of Square of Error) választottuk. Kidolgoztunk olyan ALGOL eljárásokat, amelyek állandó, koncentrált paraméterű valamint holtidős tagokat tartalmazó egyváltozós lineáris szabályozási rendszerekben determinisztikus jelekre létrejött tranziens időfüggvények négyzetes integrálkritériumának kiszámítására alkalmasak [2, 3].

A programok jól felhasználhatók szabályozási rendszerek tervezésében akár önállóan, akár valamely több változós szélső érték-kereső programba beépítve.

A négyzetes integrálkritérium választását indokolja, hogy ez a matematikai elemzésekben legáltalánosabban használt kritérium; kiértékelése a frekvenciatartományban is elvégezhető; igen jól gépesíthető; ez integrál minimuma „elég jó" időfüggvényt biztosít; szelektivitása nem rosszabb más idővel súlyozatlan kritériumoknál.

Ez utóbbival kapcsolatban megjegyezzük, hogy nem látjuk elég indokoltnak Graham, D. és Lathrop, R. C. [6] azon megállapítását, hogy az ISE kritérium nem alkalmas szabályozási rendszerek optimalitásának eldöntésére. A [6]-ban végzett szelektivitási vizsgálatoknál ugyanis idővel súlyozott és súlyozatlan kritériumokat is vetettek össze egymással és ez nyilván az előbbiek javára döntött. A szelektivitási vizsgálatoknál nyilván csak az időfüggő súlyozó függvényt azonos formában tartalmazó integrálok összevetéséből vonhatunk le helyes következtetéseket, hiszen az idő valamely függvényével súlyozó integrálkritériumok későbbi időpontban fellépő ugyanakkora hibát nagyobb súllyal vesznek figyelembe.

Azt a tényt, hogy az ISE kritérium szelektivitása viszonylag kicsi (tehát a függvény a szélső értéke közelében elég lapos), az optimalizáláskor megfelelő (deriváltakat nem használó) szélső érték-kereső programmal ellensúlyozhatjuk.

Az ISE kritérium választása mellett szól az a tény is, hogy a [6]-ban optimálisnak mondott, az idővel súlyozott abszolút érték kritérium (a továbbiak-

ban ITAE) alapján kidolgozott standard formulák is vezethetnek helytelen eredményekre. (Erre a cikk második részében térünk vissza.)

Az $x(t)$ időfüggvény négyzetes integrálkritériumának definíciója:

$$\mathrm{ISE} = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t)\,dt. \tag{1.2}$$

A Parseval-tétel [1, 2, 8] szerint az ISE integrálnak az időtartománybeli alakjával egyenértékű a frekvenciatartományban felírt következő kifejezés:

$$\mathrm{ISE} = \frac{1}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty} X(-s)\,X(s)\,ds = \frac{1}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty} |X(s)|^2\,ds. \tag{1.3}$$

ahol $s = j\omega$ és $X(s) = L\{x(t)\}$.

Ez utóbbi kifejezés még a következő alakban is írható :

$$\mathrm{ISE} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} |X(j\omega)|^2\,d\omega = \frac{1}{\pi}\int_{0}^{\infty} |X(j\omega)|^2\,d\omega, \tag{1.4}$$

ahol kihasználtuk, hogy $|X(j\omega)|^2$ páros függvény.

Ha $X(s)$ racionális törtfüggvény, azaz a szabályozási kör nem tartalmaz holtidős tagot, tehát

$$X(s) = \frac{C(s)}{D(s)} = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} c_k s^k}{\sum_{k=0}^{n} d_k s^k}, \tag{1.5}$$

akkor ISE kiszámítása egy lineáris egyenletrendszer megoldására vezethető vissza [1, 8, 9]. A számítás során feltételezzük, hogy a $D(s)$ valós együtthatójú polinomnak csak bal oldali zérushelyei vannak, valamint azt, hogy a $C(s)$ valós együtthatójú polinom legalább eggyel alacsonyabb fokú, mint $D(s)$. Az integrál kiszámításához megoldandó egyenletrendszer:

$$\mathbf{B} = \mathbf{DA}. \tag{1.6}$$

Itt

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{2n-2} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_0 \\ -a_1 \\ \vdots \\ (-1)^{n-1}a_{n-1} \end{bmatrix}, \tag{1.7}$$

ahol

$$2b_m = \begin{cases} \sum_{k=0}^{m} (-1)^k C_k C_{m-k} & 0 \le m \le n-1 \\ \sum_{k=m-n+1}^{n-1} (-1)^k C_k C_{m-k} & n \le m \le 2n-2 \end{cases} \tag{1.8}$$

Ha n páratlan, akkor

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ d_2 & d_1 & d_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n-1} & d_{n-2} & d_{n-3} & \dots & d_0 \\ 0 & d_n & d_{n-1} & \dots & d_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & d_{n-1} \end{bmatrix}. \tag{1.9}$$

Ha n páros, akkor

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ d_2 & d_1 & d_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_n & d_{n-1} & d_{n-2} & \dots & d_1 \\ 0 & 0 & d_n & \dots & d_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & d_{n-1} \end{bmatrix}. \tag{1.10}$$

A fenti egyenletrendszert az a_{n-1} együtthatóra megoldva, a keresett integrál:

$$I = \frac{a_{n-1}}{d_n}. \tag{1.11}$$

Az „ISEL" elnevezésű ALGOL-eljárásunk a szabályozási kör paramétereiből a kívánt módon képezi a $C(s)$ és $D(s)$ polinomokat, a c_k és d_k együtthatókból előállítja az (1.6) egyenletrendszer együtthatóinak mátrixát, majd az egyenletrendszer megoldásával kiszámítja a négyzetes integrál értékét. A szabályozás struktúrájának változtatásakor a programban csak a c_k és d_k paramétereket előállító eljárást kell megváltoztatni. A legtöbb nagy teljesítményű számítógép által a $D(s)$ polinom fokszámára megadott korlátozás a gyakorlatban előforduló feladatokra ($n<20$) nem jelent megkötést.

Röviden ismertetjük a programot.

```
procedure ISEL (n, y, parameter, transformer, generator, les)
value n; integer n; real y; array parameter;
procedure transformer, generator, les;
transformer (Parameter, C, D);
generator (n, C, D, A);
les (N, A, X);
y: = (—1) ↑ (n—1)×X[n—1]/D[n]
end ISE;
```

Kimeneti paraméter: y — az integrál értéke. A programban szereplő többi eljárás szerepe a következő:

1.

procedure transformer (parameter, C, D);
array parameter, C, D;
.....
($C[1 : n-1]$ és $D[1 : n]$ tömbök előállítása a rendszer paramétereiből)
.....
end transformer;

A programnak tehát ez az eljárása az, amelyiket a szabályozási rendszer struktúrájának megfelelően kell mindig kialakítani.

Az eljárás kialakításához nyújtunk segítséget a függelékben közölt „MULT" és „ADD" elnevezésű eljárásokkal, melyek segítségével polinomok összeadása és összeszorzása végezhető el.

2.

Az (1.6) egyenletrendszer **B** és **D** mátrixát előállító „generator" elnevezésű eljárást a függelékben közöljük. Az eljárás kimeneti A tömbje tartalmazza az egyenletrendszer kibővített mátrixát.

3.

procedure les (n, A, X);
.....
(Az (1.6) egyenletrendszer megoldását adja az X vektorban.)
.....
end les;

Az egyenletrendszer megoldására mi a Gauss—Jordan-féle eliminációs módszert használtuk.

Az „ISEL" eljárást ALGOL-programmá kiegészítve, ismert eredményű számpéldákon próbáltuk ki. [9] és [10]-ben beszámolnak egy olyan ALGOL-eljárás elkészültéről, melynek segítségével kiszámítható ISE és ISTSE (lásd (1.15)-nél) értéke. Az ott ismertetett program felépítése igen bonyolult, a számítás is hosszadalmas, így nem felelt volna meg céljainknak, azaz az optimalizálásra történő felhasználásnak. Egyébként magát a programot nem közölték.

Ha a szabályozási rendszerben holtidős tag is található, akkor az integrálkritérium értékét nem tudjuk a lineáris egyenletrendszer megoldásához hasonló egyszerű úton kiszámítani, mivel $X(s)$ nem racionális törtfüggvény. Célszerűnek látszott ilyenkor ismét az (1.3) összefüggéshez fordulni, amelyet (1.4) alapján a frekvenciatartományban tudunk kiértékelni.

Az (1.4) improprius integrál kiértékelését a numerikus Laplace-transzformációban szokásos módszerekhez hasonlóan végeztük el. Eszerint a $[0; \infty]$ intervallumot az

$$\Omega = e^{-\omega} \tag{1.12}$$

transzformáció segítségével a $[0; 1]$ intervallumba vittük át.

Tehát

$$\mathrm{ISE} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} |X(j\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} G^2(\omega)\, d\omega = \frac{1}{\pi}\int_0^{1} G^2\left(-\ln\frac{\Omega}{\Omega}\right) d\Omega . \tag{1.13}$$

alakú lesz kiértékelendő integrálunk. Itt $G(\omega) = |X(j\omega)|$.

Mivel az integrandusznak szakadása van az $\Omega = 0$ helyen, ezért az integrál alsó határának egy kis értékű a számot választunk ($a \sim 10^{-3} - 10^{-6}$), a számológép számtartománya és a kívánt pontosság függvényében. Így

$$\mathrm{ISE} \cong \frac{1}{\pi}\int_a^{1} G^2\left(-\ln\frac{\Omega}{\Omega}\right) d\Omega . \tag{1.14}$$

Ezen, most már határozott integrál kiértékelésére a Romberg—Stiefel—Bauer-féle numerikus módszert használtuk fel [11, 12]. A numerikus analízis általános megállapítása ugyanis, hogy a Newton—Cotes formulák közül egyszerűsége és gyors konvergenciája miatt a trapézformulán alapuló Romberg-féle módszer a legjobban alkalmazható [13].

Az (1.4) integrál kiszámításához nem feltétlenül szükséges az (1.12) átalakítás. Meg kell jegyeznünk, hogy azonos ω-nak megfelelő tartományra a kétféle módon számított integrálnál, azonos pontosság mellett az (1.14) ad kevesebb iterációt és így gyorsabb is.

Hasznossága miatt közöljük ezt az eljárást is:

```
procedure ISER (n, y, parameterek, romberg);
value n; integer n; real y; real procedure romberg; array parameterek;
romberg (a, b, f, eps, ord);
y: = romberg/3.141592
end ISER;
```

A „romberg" eljárást a függelékben közöljük. Itt a *real procedure* f eljárás az, amely a rendszer paramétereiből az integrandusz függvényt előállítja, tehát megfelel az „ISEL" *procedure* transformer eljárásának.

Az eljárás felhasználásával készült programot egy és kéttárolós holtidős szakaszokat tartalmazó szabályozási körökben próbáltuk ki, sikerrel.

Az „ISEL" és „ISER" eljárások az

$$\text{ISTSE} = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 x^2(t)\, dt. \tag{1.15}$$

idő négyzetével súlyozott négyzetes integrálkritérium (ISTSE: Integral of Squared Time multiplied Square of Error) is kiértékelhető [1, 8, 9], ugyanis

$$\text{ISTSE} = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \chi(-s)\, \chi(s)\, ds = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} |\chi(j\omega)|^2\, d\omega, \tag{1.16}$$

ahol

$$\chi(s) = -\frac{d}{ds} X(s). \tag{1.17}$$

Változás tehát csak a *procedure* transformer és *real procedure* f eljárásokban következik be.

Az elkészült eljárásokat igen hasznosan tudjuk alkalmazni szabályozástechnikai rendszerek tervezésében. Önmagukban is felhasználhatók, de a legjobb alkalmazási módot többváltozós szélső érték-kereső programba történő beépítés jelenti, így ugyanis az adott struktúrájú szabályozási rendszer optimális paramétereit is megkaphatjuk.

2. Az optimális paraméterek megkeresésére szolgáló algoritmusok

Optimálisnak nevezünk egy szabályozási rendszert, ha valamely megfelelően megválasztott átmeneti folyamatára az integrálkritérium kiszámított értéke minimumot ér el. A feladat tehát ilyen megfogalmazásban visszavezethető egy többváltozós függvény szélső-értékének (minimumának) megkeresésére.

Mivel az alkalmazott optimalitási kritérium (ISE) szelektivitása viszonylag kicsiny, azaz a függvény meglehetősen lapos az optimum környezetében, célszerűnek látszott olyan szélső érték-kereső eljárást választani, amely nem használja fel a függvény deriváltjait. Így a tiszta kereső módszernek tekinthető algoritmusok közül kettőre készítettünk ALGOL eljárást.

Az „OPTADJ-1" a minimum helyét **Rosenbrock** módszerével határozza meg [17]. Az eljárás nem használja fel a függvény deriváltjait. Az adott irány mentén a minimum meghatározása egy optimális elhatároló eljárással történik (**Fibonacci** módszer [16]).

Az „OPTADJ-2" a minimum helyét a szekvenciális szimplex módszerrel [18, 19] határozza meg. Ez az eljárás sem használja fel a függvény deriváltját.

Az elkészült programokat ismert szélső értékű n dimenziós függvényeken próbáltuk ki eredményesen.

A választott módszerek nem a leggyorsabb eljárások közül valók, viszont igen jól kézbentarthatók és a korlátozásokat könnyű figyelembe venni. Az eljárások az n változós függvény lokális minimumának helyét szolgáltatják egy adott korlátnál kisebb hibával. (Erre vonatkozó általános követelményt a deriváltakat használó módszereknél nehéz felállítani [14, 15].)

Mindkét eljárásnál a következő korlátozásokat lehet beiktatni a keresés közben:

a) A paraméterek csak pozitív értékeket vehetnek fel;
b) ISE értéke nem lehet negatív;
c) ISE értéke egy adott korlátot nem haladhat meg.

A keresést az algoritmusok mindig egy előre megadott pontból kezdik. A szimplex módszernél a kezdeti szimplex élét is meg kell adni. A kezdeti szimplex elhelyezését úgy választottuk meg, hogy az *a)* feltételt minden új lépéshossznál biztosítsa.

A kiindulási pont és a kezdeti élhossz megállapításához, valamint annak eldöntésére, hogy a függvénynek létezik-e szélső értéke, és ha igen, akkor unimodális-e, minden esetben részletesen elemezni kell a szabályozási rendszer struktúráját. Az elkészült eljárások ugyanis csak a függvény lokális szélső értékét keresik meg. Az optimum abszolút voltát eldöntő más eljárások lényegesen lassabbak és bonyolultabbak a közölteknél.

Összefoglalás

Az elkészült ALGOL-programcsalád lehetővé teszi, hogy a négyzetes integrálkritérium alapján optimális lineáris szabályozási rendszereket tervezzünk.

Az eljárások egymáshoz jól illeszthetők és megbízható eredményeket szolgáltatnak.

Ha a szabályozási kör nem tartalmaz holtidős tagot, akkor a vizsgált időfüggvény négyzetes integrálját az „ISEL" programmal számíthatjuk ki.

Megoldottuk az ISE számítását holtidős tagokat tartalmazó szabályozási rendszereknél is, ezt a feladatot az „ISER" eljárásunk végzi el.

Az optimalizálási feladat megoldására felhasznált szélső érték-kereső eljárásaink (OPTADJ-1, OPTADJ-2) a többváltozós függvény (jelen esetben az ISE értékének) lokális minimumát határozzák meg adott pontossággal.

A létrehozott eljárások elve már régen ismeretes, munkánk fő eredménye, hogy azokra kipróbált algoritmusokat készítettünk és azokat a lineáris szabályozási rendszerek optimalizálási feladatának megfelelő egységbe foglaltuk.

Ezen ALGOL-programok lineáris szabályozási rendszerek optimális tervezésére történő felhasználását néhány példán és cikkünk második részében mutatjuk be.

IRODALOM

1. Csáki F.: Szabályozások dinamikája, Akadémiai Kiadó, Budapest 1966.
2. Csáki, F.: A Short Survey of Deterministic Optimisation Techniques Based on Integral Criteria, *Periodica Polytechnica* **12,** 1.
3. Kovács, T.– Keviczky, L.: ALGOL Procedures for the Evaluation of Quadratic Integral Criterious, *Periodica Polytechnica*, (In the press.).
4. Feldbaum, A. A.: Integralnüje kriterii kacsesztva regulirovanija. *Avtomatika i telemenanika* **9.** (1948) 1.
5. Nims, P. T.: Some Design Criteria for Automatic Controls, *Trans. AIEE*, **70,** (1951), 606—611.
6. Graham, D.– Lathrop, R. C.: The Synthesis of Optimum Transient Response. Criteria and Standard Forms. *Trans. AIEE*, **72,** (1953), 273—288.
7. Schultz, M. A.— Rideout, V. C.: The Selection and Use of Servo Performance Criteria. *Trans. AIEE*, Appl. and Ind., January, (1958) 383—388.
8. Gilbert, E. G.: Dynamic-Error Analysis of Digital and Combined Analogue-Digital Computer Systems, *Simulation*, (1966), 241—257.
9. Schneider, F.: Geschlossene Formeln Berechnung der quadratischen und der zeitbeschwerten quadratischen Regelfläche für kontinuierliche und diskrete Systeme, *Regelungstechnik*, **14,** (1966), 159—166.
10. Schneider, F.: Die Auswertung der Geschlossenen Formeln zur Berechnung der quadratischen und der zeitbeschwerter quadratischen Regelfläche für kontinuierliche und diskrete Systeme mit Hilfe des Digitalrechners, *Regelungstechnik*, **14,** (1966), 557—562.
11. Bauer, F. L.: Romberg Integration, Algorithm 60 CACM, 4—61, 255.
12. Filippi: Das Verfahren von Romberg—Stiefel— Bauer . . *Matematik, Technik. Wirtschaft*, **11.** (1964) 2.3.
13. Ralston, A.: A First Class in Numerical Analysis. Mc Graw-Hill Book Co., New York—London 1965.
14. Wilde, J. D.: Optimum Seeking Methods, Prentice-Hall. Inc. 1964.
15. Brooks, S. H.: A Comparison of Maximum-Seeking Methods, Operations Research, **7,** 430, 1959.
16. Johnson, S. M.: Optimal Search for a Maximum is Fibonaccian, Rand Corp. report, P-856, 1956.
17. Rosenbrock, H. H.: An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function, Computer Journal, **3,** 175.
18. Spedley, W., Hext, G. R., Himsworth, F. R.: Sequential Application of Simplex Design in Optimization and Evolutionary Operation, Technometrics, **4,** 441. 1962.
19. Ermuratszkij, P. V.: Szimplekszнüj metod optimizacii, Trudü MEI, Vüpuszk 67, Moszkva, 1966.
20. Vámos, T.— Gyürky, F.: Some Remarks on the Optimum Setting of Variable Parameter Process- Controllers, *Acta Techn. Hung.* **54,** (1966), 439—452.

Függelék

```
procedure generator (n, c, d, a);
value n; integer n; array c, d, a;
begin integer i,k, l, m, li, lk; real s;
array b[1 : n], dd[1 : n, 1 : n];
for m : = 0, m + 2 while m ≤ n − 1 do begin s : = 0;
for k : = 0 step 1 until m do s : = s + (−1) ↑ × c[k + 1]× c[m − k + 1];
b[m/2 + 1] : = s/2; l : = m end;
for m : = 1 + 2, m + 2 while m ≤ 2 × n − 2 do begin s : = 0;
for k : = m − n + 1 step 1 until n − 1 do
s : = s + (− 1) ↑ k × c[k + 1] × c [m − k + 1];
b[m/2 + 1] : = s/2 end;
if (n ÷ 2) × 2 = n then begin li : = n/2 + 1; lk : = n/2 − 1 end
else begin li : = (n + 1)/2; lk : = (n − 1)/2 end;
for k : = 1 step 1 until n do for l : = 1 step 1 until n do
if 2 × k − l ≥ 1 ∧k ≤ li then dd[k, l] : = d[2 × k − 1] else
dd[k, l] : = 0;
```

```
for k : = 0 step 1 until n − 1 do for 1 : = 0 step 1 until n − 1 do
if 2 × k − 1 + 1 ≥ 0 ∧ 2 × k − 1 ≤ n − 1 ∧ k ≤ 1k then dd[n − k, n − l] : =
d[n − 2× k + l];
for k : = 1 step 1 until n do begin for 1 : = 1 step 1 until n do
a[k, l] : = dd[k, l]; a[k, n + 1] : = b[b]
end generator;
real procedure romberg (a, b, f, eps, ord);
value a, b, eps, ord; integer ord; real a, b, eps;
real procedure f;
begin real q, s, f0, il, i2, x, delta;
integer j, k, p; array t[1 : ord + 1];
s : = b − a; x : = a; il : = f(x); x: = b;
t[1] : = (il + f(x)) × s/2; il : = 0
for k : = 1 step 1 until ord do begin
i2 : = 0; s : = s/2; p : = 2 ↑ k
for j : = p − 1 step −1 until 1 do begin
x : = j/p; x : = x × a +(1 − x) × b; f0 : = f(x);
i2 : = i2 + f0 end;
i2 : = t[k + 1] : -t[k]/2 + i2 × s; q : = 1
for j : = k step −1 until 1 do begin q : = 4 × q;
i2 : = t[j] : = (i2 × q − t[j])/(q − 1) end:
delta : = abs((i2 − il)/i2);
if delta ≤ eps then goto fine; il : = i2 end;
fine: romberg : = i2
end romberg;
procedure mult (a, b, c, m, n, mn);
array a, b, c; value m, n; inter m, n, mn;
begin real s; integer i, k;
c[0]; = a[0] × b[0]; mn : = m + n;
for k : = 1 step 1 until m + n do begin s : = 0;
for i : = 0 step 1 until k do if i ≤ m ∧ k − i ≤ n
then s : = s + a[i] × 1[k − i]; c[k] : = s
end end mult;
procedure add(a, b, c, m, n, mn);
array a, b, c; value m, n; integer m,.n,.mn;
begin integer max, i;
if m ≥ n then max : = m else max : = n; mn = max;
for i : = 0 step 1 until max do begin if m < n then goto c1;
if n − i ≥ 0 then c[m − i] : = a[m − i] + b[n − i] else
c[m − i] : = a[m − i] goto c2;
c1 : if m − i ≥ 0 then c[n − i] : = a[m − i] + b[n − i] else
c[n − i] : = b[n − i]; c2 : end
end add;
procedure optadj2(n, 1, eps, t, ISEL); value n 1, eps;
integer n; real 1,eps; array t; procedure ISEL;
begin real p1, q1, p, q, yold, y, a1, s; integer i, j, k, ku,
jj, jo;
real array v[1 : n + 1], pq[1 : n + 1,1 : n], sor[1 : n],
yk[1 : n + 1], u[1 : n + 1, 1 : n];
integer array rend[1 : n + 1];
p1 : = 1/(n × 1.4142) × (n − 1 + sqrt(n + 1)) q1 : = 1/(n × 1.4142) × (sqrt(n + 1) − 1);
for i : = 1 step 1 until n + 1 do for j : = 1 step 1 until n do;
begin if i = 1 then pq[i, j] : = t[j] else if i − 1 = j then
pq[i, j] : = p + t [j] else pq[i, j]: = q + t[j] end:
for i : = 1 step 1 until n + 1 do
begin for j : = 1 step 1 until n do sor[j] : = pq[i, j];
ISEL(n, y, sor, transformer, generator, les);
yk[i] : = y end: k : = 0; goto c10; c9: if 1 le eps then goto c16;
1 : = 0.5 × 1; for i : = 1 step 1 until n do t[i] : = pq[jj, i];
goto c2; c10: for i : = 1 step 1 until n + 1 do
begin rend[i] : =i; v[i] : = yk[i]; for i : = 1 step 1 until n do
u[i, j] : = pq[i, j] end; for i : = 1 step1 until n do
```

```
for j := i + 1 step 1 until n + 1 do begin if v[i]< v[j]
then begin a1 := v[i]; v[i] := v[j]; v[j] := a1; jo := rend[i];
rend[i] := rend[j]; rend[j] := jo end end: ku := 1;
c13 : if rend[ku] = k then goto c15; k := rend[ku]; yold :=
yk[k]; for j := 1 step 1 until n do begin s := 0;
for i := 1 step 1 until n + 1 do s := s + 2/n × pq[i, j];
pq[k, j] := s −(2 + n)/n × pq[k, j] end:
for j := 1 step 1 until n do begin if pq[k,j] < 0 then
goto c7; sor[j] := pq[k, j] end:
ISEL(n, y, sor, transformer, generator, les); yk[k] := y;
if yk[k] le yold then goto c10; c7: for j := 1 step 1
until n do pq[k, j] := u [k, j]; yk [k]: = yold; if ku < n + 1
then goto c15;
jj := rend[n + 1]; goto c9; c15: ku: = ku + 1; goto c13;
c16: text a fuegveeny minimumaanak becsleese;
output (yk[jj]); line: for i := 1 step 1 until n do
begin output(pq[jj, i]); line end end;
```

LINEÁRIS SZABÁLYOZÁSOK OPTIMÁLIS SZINTÉZISE DIGITÁLIS SZÁMÍTÓGÉPEN

II. RÉSZ

CSÁKI FRIGYES*—KOVÁCS TIVADAR**—KEVICZKY LÁSZLÓ***

[Beérkezett: 1970. jan. 20-án]

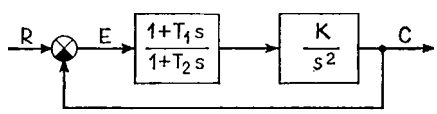
Az ismertetett eljárások alkalmazása

Az [1]-ben ismertetett ALGOL-eljárások olyan eszközöket adtak kezünkbe, amelyek segítségével minimális ráfordítással, minimális idő alatt végezhető el optimális tranziens tulajdonságú állandó paraméterű, lineáris szabályozási körök szintézise.

Jelen cikkünkben példákat közlünk az algoritmusok alkalmazására és beszámolunk az itt nyert tapasztalatokról, majd utalunk a továbbfejlesztés lehetőségeire.

Hogy a közölt példák szemléletesek legyenek, a bemutatott példákat a szabályozási körökben gyakran előforduló PI, PD, PID kompenzálás témaköréből vettük.

1. Példa.



1. ábra

Állítsuk be az 1. ábrán látható szabályozási körben a T_1 és T_2 időállandókat úgy, hogy a hibajel négyzetes integrálkritériuma (ISE) minimális legyen, ha az alapjel egységugrásfüggvény. A rendszer körerősítése legyen például $K = 777$ 1/sec^2. A hibajel L-transzformáltja ekkor:

$$E(s) = \frac{s + T_2 s^2}{777 + 777 T_1 s + s^2 + T_2 s^3} .$$

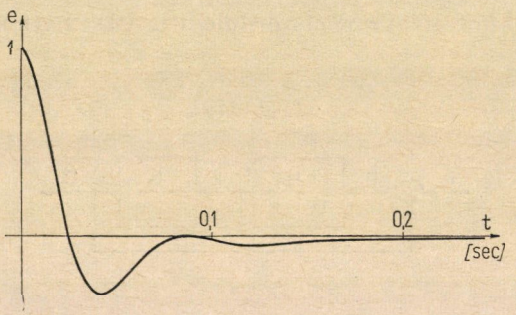
* Dr. Csáki Frigyes, V., Váci u. 8.
** Kovács Tivadar, Bpest, XI., Stoczek u. 17/b
*** dr. Keviczky László, Budapest, VII. Damjanich u. 25/a

[1]-ben rávilágítottunk arra, hogy milyen fontos az optimalizálási feladatoknál a rendszer előzetes vizsgálata. Az ebben a példában alkalmazott PD kompenzáció $T_1 > T_2$ esetben strukturálisan stabilis rendszert hoz létre. Analitikusan is bebizonyítható, de a fizikai képből is látható, hogy a leggyorsabb átmeneti folyamat $T_1 \to \infty$ és $T_2 = 0$ értékekre következik be, tehát ISE-nek nincs minimuma a végesben. A hibajel L-transzformáltja ezen paraméter értékeknél

$$E(s) = \frac{1}{777\,T_1} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{777\,T_1}s\right)},$$

tehát egy zérushoz tartó időállandójú és átviteli tényezőjű egytárolós differenciáló tagnak megfelelő.

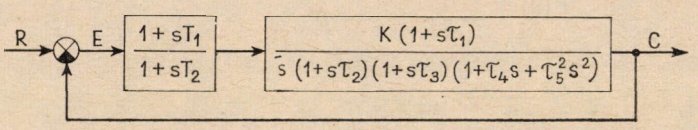
Érdekes megjegyezni azt, hogy ha T_1 és T_2-t úgy választjuk meg, hogy biztosítsák a Graham—Lathrop-féle standard átviteli függvényeket [12], akkor $T_1 = 0{,}11$ sec és $T_2 = 0{,}012$ sec értékeket kapunk. Az ezekhez tartozó hibaátmeneti függvényt a 2. ábrán látjuk. Az átmeneti függvény alakja valóban „szépnek" mondható, viszont meglehetősen távol van, az előzőleg tárgyalt optimális tranzienstől.



2. ábra

Az elmondottakat támasztja alá az a tény is, hogy a programok is a T_1 és T_2 értékére megadott korlátozási tartomány határáig keresték a szélsőértéket.

2. Példa.



3. ábra

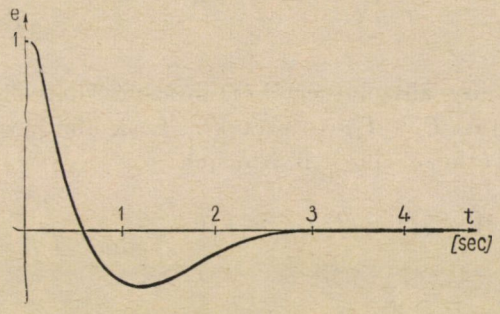
Válasszuk meg a 3. ábrán látható PD kompenzáció T_1 és T_2 paraméterét úgy, hogy ISE minimális legyen. ($R(s) = 1/s$) A szabályozott szakasz időállandói a következők legyenek:

$K = 30$ 1/sec; $\tau_1 = 1{,}25$ sec; $\tau_2 = 0{,}667$ sec;

$\tau_3 = 2{,}5$ sec; $\tau_4 = 0{,}02$ sec; $\tau_5^2 = 0{,}0025$ sec^2.

Az optimalizálás eredményeként kapott hibaátmeneti függvényt a 4. ábrán láthatjuk. Az optimális paraméterértékek:

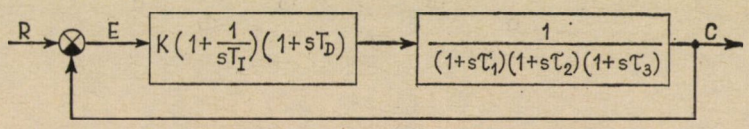
$$T_{1\,\mathrm{opt}} = 1{,}06\ \mathrm{sec}\,; \quad T_{2\,\mathrm{opt}} = 0{,}08\ \mathrm{sec}\,.$$



4. ábra

(Mivel a szabályozási körök felépítésének megváltozásakor a *procedure* transformer eljárást kell megváltoztatni, így a 2. példára készült eljárás eléggé általános, magában foglalja az 1. példát is.)

3. Példa.



5. ábra

Egy háromtárolós szabályozott szakasz optimális kompenzálására alkalmazzuk az 5. ábrán látható felépítésű szabályozót. Paraméreteit úgy kell megválasztani, hogy biztosítsák a négyzetes integrál minimumát a hibaátmeneti függvényre. A szabályozott szakasz időállandói legyenek a feladatban

$\tau_1 = 1$ sec; $\tau_2 = 2$ sec; $\tau_3 = 3$ sec

értékűek.

A számítógépes optimalizálás igen érdekes eredményeket hozott ki optimális eredményként:

$$T_{I\,\mathrm{opt}} = 1{,}64\,\mathrm{sec}\,; \quad K_{\mathrm{opt}} = 5{,}22\,; \quad T_{D\,\mathrm{opt}} = 6{,}52\,\mathrm{sec}\,.$$

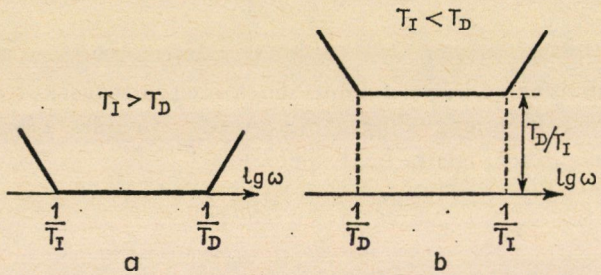
Az optimalizálás során tehát $T_I < T_D$ állapot jött létre, ami általában nem kívánatos, mivel T_I-vel a kisfrekvenciás, T_D-vel pedig a nagyfrekvenciás viselkedést szokták befolyásolni.

Vizsgáljuk meg a kérdés mögött húzódó strukturális problémákat. Legyen a szabályozó átviteli függvénye a következő:

$$G_{\mathrm{PID}}^{(1)} = K\left(1 + \frac{1}{s\,T_I}\right)(1 + s\,T_D) = K\,\frac{1 + s(T_I + T_D) + s^2\,T_I\,T_D}{s\,T_I}\,.$$

A frekvenciafüggvény abszolút értékét ábrázoló Bode-diagram látható a 6. ábrán, $T_I > T_D$ (a) és $T_I < T_D$ (b) esetekre. Ezek alapján az $G_{\mathrm{PID}}^{(1)}$ frekvenciafüggő részét a következőképpen is írhatjuk:

$$\frac{T_D}{T_I}\,\frac{1 + s(T_I + T_D) + s^2\,T_I\,T_D}{s\,T_D}\,, \quad \text{ahol} \quad T_D > T_I\,.$$



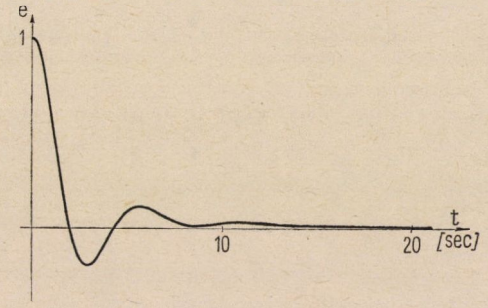
6. ábra

Ez pedig ugyanolyan átviteli függvényű tagot szolgáltat, amilyen az eredeti. Ebből következik, hogy az $G_{\mathrm{PID}}^{(1)}$ típusú szabályozóknál két, egymással teljesen ekvivalens kompenzáció lehetséges a T_I és T_D egymáshoz képesti nagyságrendi viszonyának függvényében. Mivel a számológépi programjaink lokális minimumot keresnek, így előfordulhat, hogy a $T_I < T_D$ tartományban levő optimumot kapjuk eredményként. Az előbb elmondottak szerint ilyenkor tehát nincs más teendőnk, mint T_I és T_D értékének felcserélésével elvégeznünk a megfelelő korrekciót. Ennek megfelelően az optimális kompenzáció paraméterei:

$$T_{I\,\mathrm{opt}} = 6{,}52\,\mathrm{sec}\,; \quad K = 5{,}22\,; \quad T_{D\,\mathrm{opt}} = 1{,}64\,\mathrm{sec}\,.$$

Az optimális hibaátmeneti függvény a 7. ábrán látható. Ha szükségünk van az $G^{(1)}_{\mathrm{PID}}$-nek megfelelő

$$G^{(2)}_{\mathrm{PID}} = K^* \left(1 + \frac{1}{sT_I^*} + sT_D^*\right) = K^* \frac{1 + sT_I^* + s^2 T_I^* T_D^*}{sT_I^*}$$



7. ábra

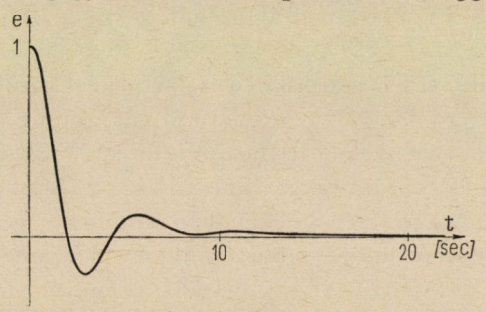
ideális szabályozó paramétereire, akkor azokat a következő képletekkel számíthatjuk:

$$T_I^* = T_I + T_D\,; \quad K^* = K \frac{T_I + T_D}{T_I}\,; \quad T_D^* = \frac{T_I T_D}{T_I + T_D}\,.$$

Az előzőleg kapott optimális paraméterek alapján:

$$T^*_{I\,\mathrm{opt}} = 8{,}16\ \mathrm{sec}\,; \quad K^*_{\mathrm{opt}} = 6{,}52\,; \quad T^*_{D\,\mathrm{opt}} = 1{,}294\ \mathrm{sec}.$$

Az ideális PID kompenzációhoz tartozó optimális hibaátmeneti függvény a 8. ábrán található, megegyezik az előző optimális időfüggvénnyel.



8. ábra

4. Példa.

Az 5. ábrán látható szabályozási körben alkalmazzuk most a következő átviteli függvényű szabályozót:

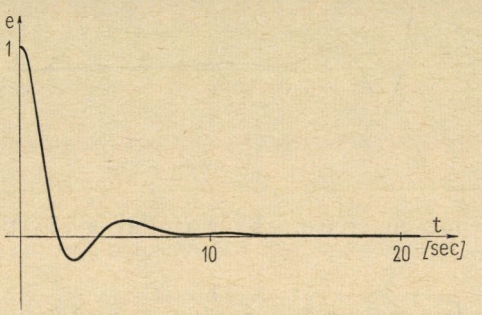
$$G^{(3)}_{\mathrm{PID}} = K \left(1 + \frac{1}{sT_I} + \frac{sT_D}{1 + s\tau}\right) = K \frac{1 + s(T_I + \tau) + s^2 T_I (T_D + \tau)}{sT_I(1 + s\tau)}\,,$$

ahol $\tau = 0{,}1$ sec. A szabályozott szakasz időállandói legyenek az előző példa szerintiek.

Az optimalizálás eredményeként most is $T_I < T_D$ adódott. Ezen paraméterek értékét megcserélve, a következő beállítási feltételeket kapjuk:

$$T_I = 6{,}42 \text{ sec}; \qquad K = 5{,}31; \qquad T_D = 1{,}69 \text{ sec}.$$

A megfelelő hibaátmeneti függvény képe a 9. ábrán látható.



9. ábra

Megjegyezzük, hogy ha az $G^{(2)}_{\text{PID}}$ vagy $G^{(3)}_{\text{PID}}$ szabályozót alkalmazzuk, akkor analitikusan nem lehet megindokolni az előzőekben felhasznált korrekciót, mivel a számláló csak $T_I > 4\,T_D$ esetben alakítható szorzattá és akkor érvényesek az $G^{(1)}_{\text{PID}}$-nél elmondottak. A 4. példából látható, hogy T_I és T_D felcserélése még ideális PID szabályozónál is megengedhető az optimális értékeknél.

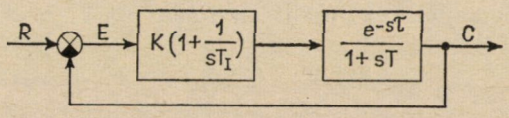
Az eddig megoldott feladatokban a szabályozási körök nem tartalmaztak holtidős tagot, tehát a hibajel L-transzformáltját mindig kifejezhettük racionális törtfüggvénnyel (bár ezeket itt nem részleteztük). Így a négyzetes integrálkritérium értékének kiszámítására az „ISEL" eljárásunkat használhattuk fel. A szélső érték megkeresésére a szimplex módszert alkalmaztuk, mivel az gyorsabbnak bizonyult a másik módszerünknél. A számítás ideje egy és két perc között változott (RAZDAN-3 digitális számítógépen) a kezdeti pont megválasztásától függően. Általában mondhatjuk, hogy jó kezdeti pontnak bizonyulnak a szabályozókra vonatkozó más, nem optimális, beállítási módok alapján választott értékek.

Az érdekesség kedvéért néhány példánál az optimális paramétereket az idő négyzetével súlyozott négyzetes integrálkritérium alapján is meghatároztuk. Ez nem eredményezett lényeges változásokat az optimális paraméterek értékében, viszont sokkal bonyolultabb L-transzformáltakat kellett beprogramozni.

5. Példa.

Tekintsük a 10. ábrán látható PI szabályozóval kompenzált, egytárolós holtidős szabályozott szakaszt tartalmazó rendszert. Válasszuk meg a szabályozó K és T_I paraméterét úgy, hogy a hibaátmeneti függvény ISE szerint optimális legyen. A szabályozott szakasz időállandói a következők:

$$\tau = 2 \text{ sec}; \qquad T = 10 \text{ sec}.$$

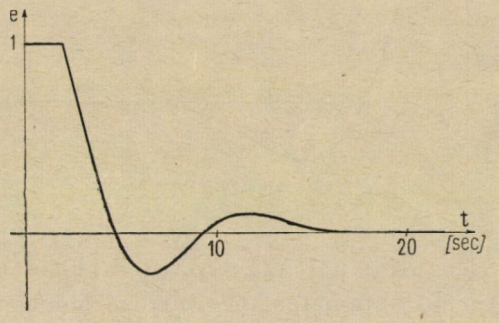


10. ábra

Az optimalizálást elvégezve

$$K_{\text{opt}} = 3{,}92 \quad \text{és} \quad T_{I\,\text{opt}} = 13{,}77 \text{ sec}$$

optimális értékeket kapunk. A hibaátmeneti függvényt a 11. ábra mutatja.



11. ábra

Ez a számítás több mint tíz percig tartott, tehát általában egy nagyságrenddel több, mint a holtidő nélküli rendszerekre. Ebből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy ez a számítási mód a jelenleg rendelkezésünkre álló számológépek gyorsasága mellett nem alkalmas beállítási célokra szolgáló diagramok kidolgozására, viszont egyedi tervezési feladatok megoldására nagyon jól alkalmas.

Mivel távolabbi céljaink között szerepel beállítási diagramok kidolgozása is, megpróbáltuk a számítási időt lecsökkenteni. Ha a holtidős tag helyén annak valamely PADE sorfejtését [6] alkalmazzuk, akkor az $E(s)$ L-transzformáltra

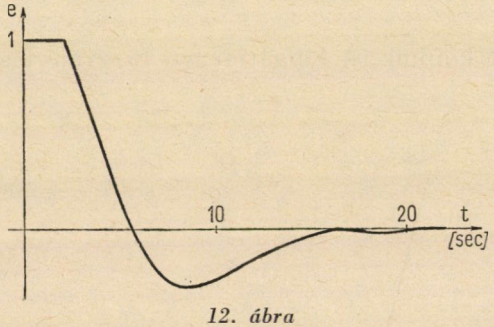
ismét racionális törtfüggvényt kapunk, tehát felhasználhatjuk a gyorsabb „ISEL" eljárást. Legyen a közelítés a következő:

$$e^{-s\tau} = \frac{1 - \frac{1}{2}s\tau + \frac{1}{10}s^2\tau^2 - \frac{1}{120}s^3\tau^3}{1 + \frac{1}{2}s\tau + \frac{1}{10}s^2\tau^2 + \frac{1}{120}s^3\tau^3}$$

Ezt felhasználva, a kapott optimális eredmények:

$$K_{\text{opt}} = 2{,}8\,; \quad T_{I\,\text{opt}} = 5{,}5\,\text{sec}\,.$$

A hibaátmeneti függvény a 12. ábrán található. Az időfüggvényről látható, hogy még távol van a 11. ábrán bemutatott ideális optimális függvénytől, de beállítási célokra teljesen megfelelő. A pontosság természetesen az $e^{-s\tau}$-t közelítő tag rendszámának növelésével fokozható.



12. ábra

A tervezési feladatokat a RAZDAN-3 digitális számítógépen oldottuk meg. A kapott optimális paraméterekhez tartozó időfüggvények meghatározásához a holtidő nélküli rendszereket a MEDA-40 TA analóg számológépen, a holtidős rendszereket pedig a MINSZK-22-es digitális számológépen a BOCS digitális szimulációs program segítségével modelleztük. [13]

Következtetések

A szemléltetésre került példák jól illusztrálják azt, hogy az elkészült ALGOL programok igen hasznos segítőtársnak bizonyulnak a lineáris szabályozási rendszerek optimális tervezésekor. Segítségükkel a közölt, viszonylag egyszerűbb feladatok mellett bonyolultabb, speciális esetet is magába foglaló problémák is megoldhatók.

A módszerek amellett, hogy igen gyorsan szolgáltatják a kívánt optimális eredményt, értékes felvilágosításokat nyújthatnak a rendszer strukturális kérdéseiről, mint azt az előzőekben is láttuk.

Megmutattuk, hogy a feladatok megoldásakor milyen nagy szerepe van a rendszer előzetes strukturális elemzésének. Ekkor kell valamely hagyományos tervezési mód (pl. a Bode-diagramok) segítségével az optimálizálás kezdőpontját valamint egyéb segédmennyiségeket (hiba, lépéshossz stb.) megválasztani. Ha lehetséges, előre meg kell vizsgálnunk, hogy a szélső érték létezik-e (lásd 1. példa), és ha igen, akkor a függvénynek csak egy szélső értéke van-e vagy pedig több (lásd 3. példa).

A PID kompenzáció vizsgálata során megállapítottuk, hogy a négyzetes integrálnak, mint többváltozós függvénynek két egymással egyenértékű minimuma van. Ha a kereső algoritmus a nem kívánt ($T_i < T_D$) minimumot határozza meg, akkor a korrekció csupán T_i és T_D értékének megcserélésében áll.

Legértékesebb eredményünk, hogy megoldottuk a holtidős szabályozási körök optimalizálásának problémáját az „ISER" eljárással (Lásd 5. példa).

Legközelebbi feladatunknak tekintjük, hogy az elkészült programok segítségével beállítási diagramokat dolgozzunk ki egyszerű szabályozott szakaszok optimális PI és PID kompenzálásához.

Mivel a programok felhasználási területe rendkívül széles körű lehet, távolabbi céljaink között szerepel azok kiterjesztése digitális, sztochasztikus és nemlineáris rendszerekre, majd ezek többhurkú változatára is.

IRODALOM

1. Csáki, F.—Keviczky, L.—Kovács, T.: Optimal Synthesys of Linear Control Systems by Digital Computer, Part. I, *Acta Techn. Hung.* 1970 (In the press).
2. Csáki, F.: Control Dynamics, Akadémia Kiadó. Budapest 1966
3. Kovács, T.—Keviczky, L.: ALGOL Procedurs for the Evaluation of Quadratic Integral Criterions, *Periodica Polytechnica*, (In the press).
4. Gibson, J. E.: Szisztemü szamooptimizacii ili szamonasztravajucsieszja szisztemü avtomaticseszkogo regulirobanyija, IFAC, 1966 Moszkva.
5. Feldbaum, A. A.: Osznovü teorii optimalnüh avtomaticseszkih szisztem, Moszkva 1963.
6. Truxal, J. G.: Control System Synthesis, Mc Graw-Hill Book C. Inc., New York 1955.
7. Oldenbourg, R.—Sartorius, H.: The Dynamics of Automatic Controls, *ASME*, New York 1948.
8. Herriot, P.: Process Control, Mc Graw-Hill Book C. Inc., New York—San Francisko 1964.
9. Tustin, A.: Method of Analysing the Behaviour of Linear Systems in Terms of Time Series, Proc. IEE, **94**, (1947), 130—142.
10. Oldenbourg, G.—Sartorius, H.: A Uniform Approach to the Optimum Adjustment of Control Loops, *AMSE-Transaction*, **76**, (1954), 1265—1279.
11. Newton, G.—Gould, L.—Kaiser, J.: Analytical Design of Linear Feedback Controls, John Wiley Et Sons, New York 1957.
12. Graham, D.—Lathrop, R. C.: The Synthesis of Optimum Transient Response. Criteria and Standard Forms, *Trans. AIEE*, **72**, (1953), 278—288.
13 Kálmán, R.—Bakonyi, P.: BOCS blokk orientációs programrendszer a MINSZK-22 digitális számítógépre, Mérés és Automatika, **15**, (1967) 3.

Optimal Synthesis of Linear Control Systems by a Digital Computer. The present paper describes an ALGOL program system whereby the optimal synthesis of linear control systems can be performed on the basis of the quadratic integral criterion.

Optimaler Entwurf von linearen Regelungssystemen mit Hilfe von Digitalrechnern. Es wird eine Programmfamilie in algorithmischer Sprache ALGOL für den optimalen Entwurf der linearen Regelsysteme auf Grund der quadratischen Regelfläche beschrieben.

HEXAGONÁLIS KRISTÁLYOK SZTEREOGRAFIKUS PÓLUSÁBRÁINAK MEGHATÁROZÁSA SZERKESZTÉS NÉLKÜL

PROHÁSZKA JÁNOS*
AZ MTA LEVELEZŐ TAGJA

[Beérkezett 1971. szeptember 30-án]

A dolgozatban ismertetésre kerül egy olyan eljárás, mely a köbös és a hexagonális szerkezetű kristályok sztereografikus pólusábráinak rendkívül egyszerű meghatározására szolgál. Az egyes pólusok helyének a kijelölését a szokásos szerkesztési megoldással szemben az alapsíkon mérhető két helykoordinátával helyettesíti. A helykoordináták számítására egyszerű összefüggéseket ismertet, melyek számítógépes meghatározása mellett a pólusábra meghatározás nagymértékben leegyszerűsödik. Végül egy olyan eljárást is közöl, melynek segítségével egy adott c/a hányadosú hexagonális kristály 0001 pólusábrájából bármely tetszőleges tengelyarányú pólusábra nagyon egyszerűen átrajzolható.

A hexagonális kristályok orientációjával kapcsolatos feladatok megoldásánál rendszerint szükség van a sztereografikus pólusábrákra. Bár az irodalomban található néhány ilyen pólusábra, azok használatát korlátozza, hogy meghatározott c/a hányadosú kristályra vonatkoznak és ezen túlmenően csak a kristálytani síkokra merőleges irányok pólusait tartalmazzák. Bizonyos feladatok megoldásánál sokszor előfordul azonban, hogy olyan pólusábrára lenne szükség, mely az irodalomban nem szerepel. Egy új pólusábrának a megrajzolása, ill. megszerkesztése meglehetősen sok munkát igénylő feladat, mert először meg kell határozni a megfelelő rácselemek közötti szögeket, majd ezeket a szögeket a Wulf-féle háló segítségével a megfelelő pólusok helyének a megadásánál ki kell mérni. A számítógépek elterjedése lehetővé tette a számítási feladatok leegyszerűsítését. A szerkesztési munka azonban továbbra is megmaradt. Az alábbiakban a hexagonális kristályok pólusábráinak a megrajzolására olyan eljárást ismertetünk, amely a szerkesztési feladatot egyszerű hosszmérésre vezeti vissza, és azt is lehetővé teszi, hogy egy adott c/a viszonyú kristály 001 pólusábrájának segítségével egyszerű módon, tetszőleges c/a hányadosú kristálynak ugyancsak a 001 pólusábráját megrajzoljuk.

Az ismertetendő módszer lényege az, hogy a hexagonális rendszer kristálytani síkjainak és irányainak meghatározzuk a megfelelőit egy köbös koordináta rendszerben, és a számításokat ezekkel a megfelelő rácselemekkel végezzük el. A köbös kristálytani rendszerben ugyanis korlátozás nélkül érvényes az, hogy minden tetszőleges kristálytani síkra az ugyanolyan indexű

* Prof. Dr Prohászka János, Budapest, I. Tigris u. 48.

kristálytani irány merőleges. Azaz $(hkl) \perp [hkl]$. Ez a geometriai kapcsolat a köbös rendszerben a számítást nagyon leegyszerűsíti és a szerkesztési munkát felére csökkenti. A szerkesztési munka azért feleződik, mert a köbös rendszerű kristályok pólusábráiban az azonos indexű irányok és síkok pólusai éppen a fent említett geometriai kapcsolat következményeként egy közös pontra esnek. Ez az összeesés a nem köbös kristálytani rendszerekben csak speciális síkok és irányok esetében következik be. Ezért a nem köbös kristálytani rendszerek pólusábrái vagy a síkokra merőleges irányok pólusait vagy a kristálytani irányok pólusait adják meg. Így két pólusábrára van szükség; az egyik az irányok, a másik a síkok pólusaira vonatkozik. Természetesen elképzelhető, hogy egyetlen pólusábrába rajzoljuk a pólusok két seregét, azonban ebben az esetben az azonos indexű pólusok megkettőződnek és a pólusábra vagy csak nagyon kevés pólust tartalmazhat, vagy pedig az áttekinthetőség nagyon leromlik.

A két pólusábra szükségessége a legjobban egy példa kapcsán látható be. A $c/a = 1{,}633$ tengelyarányú hexagonális pólusábrán minden nehézség nélkül megrajzolhatjuk az (1012) és a $(01\bar{1}2)$ ikersíkok főköreit, és azok metszéspontja kijelöli a két ikersík metszésvonalának pólusát. Ha ezt megtesszük, mivel az irodalomban eddig ismertetett pólusábrák a kristálytani síkok pólusait adják meg, a két főkör metszéspontjában a 3368 számokat találjuk, holott a fent említett két ikersík a 2241 irányban metszi egymást. Ebből az is következik, hogy legsűrűbb illeszkedésű hexagonális rendszerben a (3368) sík merőleges a [2241] irányra. A fenti példa világosan szemlélteti, hogy a nem köbös — tehát a hexagonális kristályrendszerekben is, a pólusábra használatánál nagyon gondosan kell eljárni az azonos indexű síkok és irányok pólusainak a különállása miatt. Ezért jobbnak tartjuk két pólusábra használatát és mindkét pólusábra meghatározására bemutatjuk a számítási eljárást.

A módszert a köbös kristályok pólusábráin mutatjuk be [4], majd a hexagonális rendszerbeli feladatokat visszavezetjük a köbös rendszerbeli feladatokra.

A kristályok alapegyenlete

$$\bar{r} = \bar{r}_0 + m\bar{a} + n\bar{b} + p\bar{c}, \tag{1}$$

ahol $\bar{r}_0$ a kristály egy tetszőleges pontjába mutató vektor, az $\bar{r}$ vektor pedig a kristálynak az előbbi pontjával mindenben egyenértékű másik pontjába mutat, m, n és p egész számok, $\bar{a}$, $\bar{b}$ és $\bar{c}$ a szóban forgó kristályrendszer három transzlációs egységvektora. Így bármely $[hkl]$ kristálytani irány megadható egy vektorral a következőképpen

$$\bar{r} = h\bar{a} + k\bar{b} + l\bar{c}, \tag{2}$$

ahol h, k és l egész számok a megfelelő kristálytani irány indexei.

A köbös rendszerben jelöljük a három egymásra merőleges azonos hosszúságú transzlációs egységvektort $\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$-al. Így a köbös rendszerbeli irányok az indexekkel kifejezve ekként írhatók:

$$\bar{r} = h\bar{e}_1 + k\bar{e}_2 + l\bar{e}_3. \tag{3}$$

Az $\bar{r}$ vektorok ismeretében most már nagyon egyszerű a rácselemek geometriai kapcsolatának a meghatározása. Így pl. két irány közötti szög koszinusza az adott irányokhoz tartozó vektorok skaláris szorzata, osztva a két vektor abszolút értékének a szorzatával. Ugyanígy adódik két sík közötti szög koszinusza is, csak értelemszerűen most a két sík normálisával kell a fenti számítást elvégezni. Hasonlóan egyszerű két sík metszésvonalának a meghatározása is, mivel ez nem más, mint a két sík normálvektorának vektoriális szorzata.

Ezek után nézzük a sztereografikus pólusábra szerkesztésével kapcsolatos feladatokat. Legyen az 1. ábra szerint $\bar{e}_1$ $\bar{e}_2$ $\bar{e}_3$ a kristállyal összekötött egységvektorrendszer. Legyen $\bar{r}_z$ az a vektor, mely a pólusábra középpontjában az O ponttal megadott pólust megszabja. Ha ezenkívül még egy tetszőleges $\bar{r}$ vektor vagy annak P pólusa és P' képe is adott, akkor már megszabtuk a vetítési, vagy alapsík helyzetét is. Ezután az $\bar{r}_z$ vektorhoz kell illeszteni a koordinátarendszerünket úgy, hogy az $\bar{r}_z$-vel legyen párhuzamos a z tengely és arra merőleges az x és y tengely, ill. a nekik megfelelő $\bar{r}_x$ és $\bar{r}_y$ vektorok. Ezeket az előbbiek szerint egyszerű kiválasztani, mert a keresett vektorok skalárszorzata 0. Ezért keresni kell egy az $\bar{r}_z$-re merőleges — a számítás egyszerűsítése érdekében lehetőleg kis számokkal megadott indexű — $\bar{r}_x$ vektort. Majd ezután az $\bar{r}_z$ és az $\bar{r}_x$ vektorszorzataként adódik az $\bar{r}_y$ is.

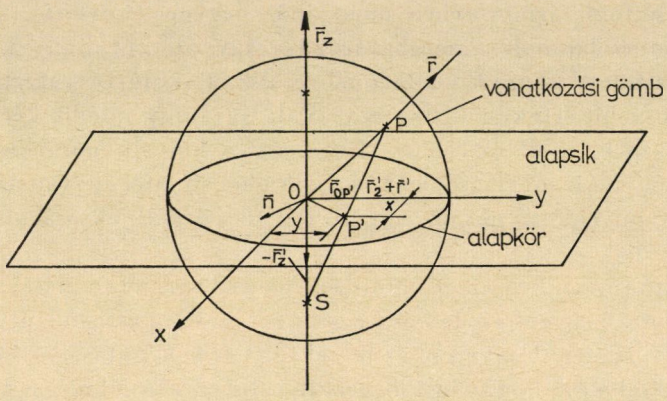
Ezzel adva van az alapkörben az O origó, mely nem más, mint az $\bar{r}_z$ vektornak a pólusa, valamint az erre merőleges $\bar{r}_x$ és $\bar{r}_y$ vektorok, melyek az x és y koordináta tengelyeket adják.

A következő probléma tetszőleges $\bar{r}$ (hkl) kristálytani irány pólusának a meghatározása ebben a koordinátarendszerben. Az 1. ábra jelöléseivel legyen $\bar{r}$ a tetszőleges irány, pólusa pedig a vonatkozási gömbnek és az $\bar{r}$ vektornak a P döféspontja. Ennek a pólusnak a P' képe az alapsíkon nem más, mint az S vetítési centrumot a P pólussal összekötő egyenes döféspontja az alapsíkkal. Ezt kell meghatározni, mert ez a pólusábra az $\bar{r}$ vektornak a pólusa.

Az OP távolság attól függ, hogy mekkora a vonatkozási gömb sugara. Ha ezt a távolságot egyszer megszabtuk, akkor minden további feladatnál ezt a távolságot kell alapul venni. Eddigi megfontolásainknál csak szögekről volt szó, és azok értéke a vektorok hosszúságától független, így azokat a gömbsugár hosszúságának mértéke nem érinti.

Legyen a gömb sugara egységnyi. Ebben az esetben a P pólust az $\bar{r}$ vektor egységnyi távolságban metszi ki a gömbből. A P pontot a vonatkozási

gömbön az $\bar{r}$ vektor $\bar{r}'$ egységvektora jelöli ki. Ha az $\bar{r}_z$ vektornak is az $\bar{r}'_z$ egységvektorát vesszük, könnyen meghatározhatjuk az S vetítési centrumot és a P pólust összekötő vektort, mely nem más, mint az $\bar{r}'_z$ és az $\bar{r}'$ vektorok vektoriális összege. (A továbbiakban minden vektor mellé írt „'" a szóbanforgó $\bar{r}$ vektor egységvektorát jelenti.)



1. ábra

A pólus x, y, koordinátáinak a meghatározásakor azonban az $\overline{OP'}$ távolságra, ill. annak az x és az y tengelyekre való vetületére van szükség. Az $\overline{OP'}$ távolság az SOP' háromszögből

$$\overline{OP} = \tan \alpha, \tag{4}$$

mivel a $-r_z$ vektor hosszúsága éppen egységnyi. A vektoralgebra szerint azonban

$$\tan \alpha = \frac{|\bar{r}'_z \times (\bar{r}' + \bar{r}'_z)|}{\bar{r}'_z \cdot (\bar{r}' + \bar{r}'_z)} . \tag{5}$$

Az x koordinátát akkor kapjuk, ha az OP' távolságot $\cos \varphi$-vel szorozzuk. Ez viszont nem más, mint az OP' irányú egységvektornak és az $\bar{r}'_x$ vektornak a skalárszorzata. Azaz

$$x = \tan \alpha \cdot \cos \varphi = \frac{|\bar{r}'_z(\bar{r}' \times + \bar{r}'_z)|}{\bar{r}'_z \cdot (\bar{r}' + \bar{r}'_z)} \cdot \frac{\bar{r}_x \cdot \bar{r}_{OP'}}{|\bar{r}_x| \cdot |\bar{r}_{OP'}|} . \tag{6}$$

Ugyanígy az y koordináta

$$y = \tan \alpha \cdot \cos (90° - \varphi) = \frac{|\bar{r}'_z(\bar{r}' \times + \bar{r}'_z)|}{\bar{r}_z \cdot (\bar{r}' + \bar{r}'_z)} \cdot \frac{\bar{r}_y \cdot \bar{r}_{OP'}}{|\bar{r}_y| \cdot |\bar{r}_{OP'}|} . \tag{7}$$

Most már csak az $\bar{r}_{OP'}$ vektor meghatározása van hátra. Az $\bar{r}_{OP'}$ vektor benne fekszik az $\bar{r}_z$ és az $\bar{r}$ vektorok síkjában és merőleges az $\bar{r}_z$ vektorra. Ezt a kapcsolatot két vektoregyenlettel fejezhetjük ki.

Határozzuk meg az $\bar{r}_z$ és az $\bar{r}$ síkjának $\bar{n}$ normálvektorát a következők szerint

$$\bar{n} = \bar{r} \times \bar{r}_z. \tag{8}$$

A keresett $\bar{r}_{OP'}$ vektor merőleges az $\bar{n}$ normálvektorra és benne fekszik az $\bar{r}_z$ és az $\bar{r}$ síkjában is. Ezt a feltételt az $\bar{n}$ és az $\bar{r}_z$ vektorális szorzata elégíti ki. Azaz

$$\bar{r}_{\overline{OP}'} = \bar{r}_z \times \bar{n}. \tag{9}$$

Ezzel minden vektort kiszámoltunk, amely a kordináták megadásához szükséges. Behelyettesítve az $\bar{r}_{OP'}$ értéket is a koordinátákat megszabó egyenletekbe, az a végeredmény adódik, hogy

$$x = \frac{\bar{r}'_z \times (\bar{r}' + \bar{r}'_z)}{\bar{r}'_z \cdot (\bar{r}' + \bar{r}'_z)} \cdot \frac{\bar{r}_x \cdot \bar{r}_z \times (\bar{r} \times \bar{r}_z)}{|\bar{r}_x| \cdot |\bar{r}_z \times (\bar{r} \times \bar{r}_z)|}, \tag{10}$$

illetve

$$y = \frac{\bar{r}'_z \times (\bar{r}' + \bar{r}'_z)}{\bar{r}'_z \cdot (\bar{r}' + \bar{r}'_z)} \cdot \frac{\bar{r}_y \cdot \bar{r}_z \times (\bar{r} \times \bar{r}_z)}{|\bar{r}_y| \cdot |\bar{r} \times {}_z(\bar{r} \times \bar{r}_z)|}. \tag{11}$$

Ezzel megadtuk minden részletében a köbös rendszerben kristályosodó anyagok pólusábráinak a meghatározásához szükséges valamennyi összefüggést, mivel a két utolsó egyenlet bármilyen tetszőleges *hkl* pólusú stereografikus pólusábra pontjainak a kiszámítására alkalmas. Az $\bar{r}_x$ $\bar{r}_y$ és $\bar{r}_z$ vektorok megfelelő kiválasztásával a számítási munka tovább egyszerűsödik. Így pl. ha az ún. 001 standard pólusábrát akarjuk megrajzolni, akkor az $\bar{r}'_x$ az [100], az $\bar{r}'_y$ a [010] és az $\bar{r}'_z$ a [001] kristálytani irányoknak felel meg. Ebben az esetben a koordinátákat az alábbi egyszerű képletek adják

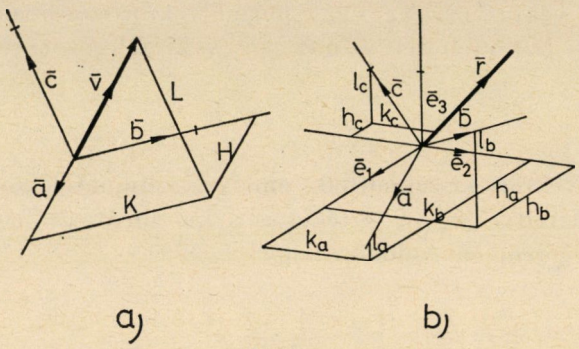
$$x = \frac{h}{l + \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}, \tag{12}$$

illetve

$$y = \frac{k}{l + \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}. \tag{13}$$

Könnyen belátható, hogy egy adott pólusábra szerkesztése a két utolsó egyenlettel sokkal egyszerűbben hajtható végre mint a szokásos módon.

A feladatunk most az, hogy ugyanilyen egyszerű módon a hexagonális kristályok pólusainak a helyét is magadjuk. Amint azt már a korábbiakban említettük, ezt úgy fogjuk megtenni, hogy minden hexagonális rácselemhez a köbös rendszerben megkeressük a megfelelő elemet és a számítást a köbös rendszerben az imént ismertetett módon végezzük el. A leszűkített feladat tehát az, hogy a hexagonális rendszer tetszőleges rácselemeit kell meghatározni a köbös rendszerben.



2. ábra

Az általános helyzetű hexagonális tengelyrendszert a 2. ábra mutatja. A három transzlációs egységvektor között fennálló geometriai kapcsolatokat az alábbiak szabják meg:

$$|\bar{a}| = |\bar{b}| \neq |c|, \tag{14}$$

és

$$\frac{\bar{a} \cdot \bar{b}}{|\bar{a}| \cdot |\bar{b}|} = -\frac{1}{2}, \quad \text{ill.} \quad \bar{a} \cdot \bar{c} = \bar{b} \cdot \bar{c} = 0. \tag{15), (16}$$

A köbös rendszerbe átrajzolt általános helyzetű hexagonális tengelyrendszert a 2b ábra mutatja. Jelöljük a kristálytani irányokat a hexagonális rendszerben $\bar{v}$-vel, a köbös rendszerben pedig továbbra is $\bar{r}$-rel. A hexagonális rendszerben a tetszőleges kristálytani irány az alábbiak szerint adható meg akkor, ha az irány indexei H, K és L. (A hexagonális rendszer indexeit nyomtatott nagybetűkkel jelöltük, hogy a köbös rácselemek indexeitől megkülönböztessük.):

$$\bar{v} = H\bar{a} + K\bar{b} + L\bar{c} \tag{17}$$

A hexagonális rendszerbeli $\bar{v}$ és a köbös rendszerbeli $\bar{r}$ vektorok természetesen párhuzamosak és egyenlő hosszúak, és mivel

$$\begin{aligned} \bar{a} &= h_a \bar{e}_1 + k_a \bar{e}_2 + l_a \bar{e}_3, \\ \bar{b} &= h_b \bar{e}_1 + k_b \bar{e}_2 + l_b \bar{e}_3, \\ \bar{c} &= h_c \bar{e}_1 + k_c \bar{e}_2 + l_c \bar{e}_3, \end{aligned} \tag{18}$$

a $\bar{v}$ tehát

$$\bar{v} = H(h_a \bar{e}_1 + k_a \bar{e}_2 + l_a \bar{e}_3) + K(h_b \bar{e}_1 + k_b \bar{e}_2 + l_b \bar{e}_3) + L(h_c \bar{e}_1 + k_c \bar{e}_2 + l_c \bar{e}_3), \tag{19}$$

vagyis

$$\bar{v} = (Hh_a + Kh_b + Lh_c)\bar{e}_1 + (Hk_a + Kk_b + Lk_c)\bar{e}_2 + (Hl_a + Kl_b + Ll_c)\bar{e}_3 = \\ = h\bar{e}_1 + k\bar{e}_2 + l\bar{e}_3 = \bar{r}. \tag{20}$$

Ez utóbbi egyenlet úgy is felírható, hogy

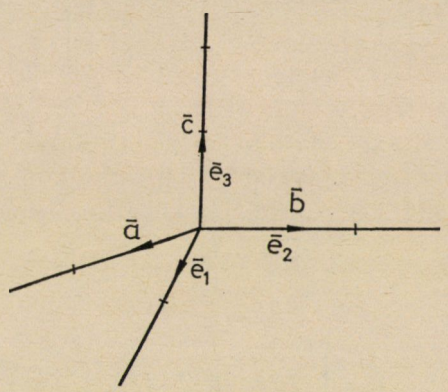
$$\begin{bmatrix} h \\ k \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_a & h_b & h_c \\ k_a & k_b & k_c \\ l_a & l_b & l_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ K \\ L \end{bmatrix}, \tag{21}$$

vagy még tömörebben

$$\bar{r} = A\bar{v}. \tag{22}$$

Az utóbbi kifejezések alapján minden [*HKL*] hexagonális rendszerbeli kristálytani irányhoz hozzárendelhetünk egy köbös rendszerbeli [*hkl*] kristálytani irányt, amelynek segítségével nemcsak a sztereografikus pólusábra pontjainak a helyét adhatjuk meg, hanem a hexagonális rendszerbeli kristálytani irányokkal kapcsolatos feladatok a köbösbeliek mintájára elvégezhetők. Ezek szerint a hexagonális kristályszerkezetek pólusábrája úgy határozható meg, hogy a kiválasztott $\bar{V}_x \bar{V}_y$ és $\bar{V}_z$ vektorok $\bar{r}_x \bar{r}_y$ és $\bar{r}_z$ vektorait megkeressük a (20) ÷ (22) kifejezések szerint, és ezekkel a vektorokkal a (10) és (11) kifejezések segítségével bármely tetszőleges $\bar{V} \sim [HKL]$ kristálytani irány pólusának a helye kijelölhető.

Ebben az esetben is nagyon egyszerűvé válik a számítás, ha pl. a hexagonális és a köbös rendszer koordináta-tengelyeit a 3. ábra szerint vesszük fel.



3. ábra

Ekkor ugyanis a (20) egyenlet több együtthatója, ill. a (21) kifejezés A mátrixának több eleme 0 értékű. Vagyis

$$\begin{bmatrix} h \\ k \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c}{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ K \\ L \end{bmatrix}. \tag{23}$$

Ennek megfelelően a HKL hexagonális rendszerbeli kristálytani iránynak a

$$\left[\frac{\sqrt{3}}{2} H;\ K - \frac{H}{2};\ \frac{c}{a} L \right]$$

köbös rendszerbeli irány felel meg a 3. ábra szerinti tengelyrendszer kiválasztásakor.

A feladatok megoldásánál gyakran felvetődhetik az a probléma is, hogy adott $\bar{r}$ (köbösbeli) iránynak a hexagonális rendszerbeli megfelelőjét kell megkeresni. Ezt a (22) összefüggés alapján könnyen felírhatjuk:

$$\bar{v} = A^{-1} \bar{r}. \tag{24}$$

Ha pedig a 3. ábra szerinti kapcsolatnál maradunk, ezt konkrétan úgy írhatjuk, hogy

$$\begin{bmatrix} H \\ K \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{a}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ k \\ l \end{bmatrix}. \tag{25}$$

A pólusábrákkal kapcsolatban levezetett korábbi összefüggések közül, ha a hexagonális rendszer irányainak a 001 standard pólusábráját kell meghatározni, a (12) és (13) összefüggések a következőképpen írhatók:

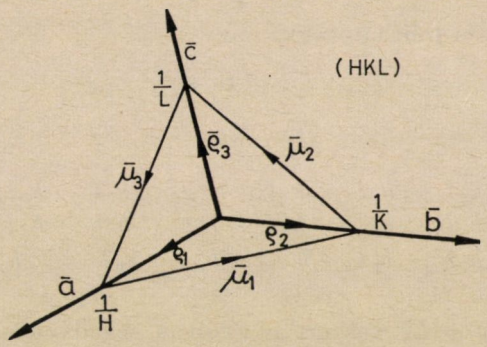
$$x_d = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} H}{\frac{c}{a} L + \sqrt{H^2 + K^2 - HK + \left(\frac{c}{a}\right)^2 L^2}}, \tag{26}$$

illetve

$$y_d = \frac{K - \frac{H}{2}}{\frac{c}{a}L + \sqrt{H^2 + K^2 - KH + \left(\frac{c}{a}\right)^2 L^2}}. \tag{27}$$

Ebben a pólusábrában a $\bar{V}_x = [210]$ $\bar{V}_y = [010]$ és $\bar{V}_z = [001]$.

Az utolsó két egyenlet segítségével bármilyen hexagonális kristály 001 pólusábrája rendkívül egyszerűen meghatározható számítással. Azt azonban itt meg kell jegyezni, hogy az irodalomban általában nem az előzőekben tárgyalt irányok pólusábrája, hanem a kristálytani síkok pólusábrája szerepel. A következőkben a hexagonális kristályok síkjainak a pólusábráira vonatkozó számítási eljárást ismertetjük.



4. ábra

Legyen a 4. ábra szerint egy (HKL) kristálytani sík az $1/H$, $1/K$ és $1/L$ tengelymetszeteivel adott. Ennek a síknak a pólusát a korábbiak szerint megadhatjuk, ha ismerjük az adott síkra merőleges $\bar{n}$ normálvektort. Ezt azonban a 4. ábra szerint bármely két $\bar{\mu}$; $\bar{\mu}_k$ vektor vektoriális szorzata megadja, ha $\bar{\mu}$-vel a szóban forgó kristálytani síknak és a koordináta tengelyekkel megszabott síkoknak a metszésvonalaival párhuzamos vektorokat tekintjük. Azaz a kristálytani síkra merőleges $\bar{n}$ normálvektor

$$\bar{n} = \bar{\mu}_1 \times \bar{\mu}_2 = \bar{\mu}_2 \times \bar{\mu}_3 = \bar{\mu}_3 \times \bar{\mu}_1. \tag{28}$$

A metszésvonalakkal párhuzamos vektorok pedig úgy adódnak, mint a szóban forgó síknak és két koordinátatengelynek a metszéspontjaiba mutató $\bar{\varrho}_i$; $\bar{\varrho}_k$ vektoroknak a különbségvektorai. Azaz

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_1 &= \bar{\varrho}_2 - \bar{\varrho}_1 = \frac{\bar{b}}{k} - \frac{\bar{a}}{H}, \\ \bar{\mu}_2 &= \bar{\varrho}_3 - \bar{\varrho}_2 = \frac{\bar{c}}{L} - \frac{\bar{b}}{K}, \\ \bar{\mu}_3 &= \bar{\varrho}_1 - \bar{\varrho}_3 = \frac{\bar{a}}{H} - \frac{\bar{c}}{L}, \end{aligned} \tag{29}$$

amint az a 4. ábrából következik.

Így

$$\bar{n} = \bar{\mu}_1 \times \bar{\mu}_2 = \begin{vmatrix} \bar{e}_1 & \bar{e}_2 & \bar{e}_3 \\ \frac{h_b}{K} - \frac{h_a}{H} & \frac{k_b}{K} - \frac{k_a}{H} & \frac{l_b}{K} - \frac{l_a}{H} \\ \frac{h_c}{L} - \frac{h_b}{K} & \frac{k_c}{L} - \frac{k_b}{K} & \frac{l_c}{L} - \frac{l_b}{K} \end{vmatrix} =$$

$$= \left[H(k_b l_c - k_c l_b) + K(h_c l_a - k_a l_c) + L(k_a l_b - k_b l_a)\right]\bar{e}_1 +$$
$$+ \left[H(h_c l_b - h_b l_c) + K(h_a l_c - h_c l_a) + L(h_b l_a - h_a l_b)\right]\bar{e}_2 +$$
$$+ \left[H(h_b k_c - h_c k_b) + K(h_c k_a - h_a k_c) + L(h_a k_b - h_b k_a)\right]\bar{e}_3. \qquad (30)$$

Ez az utolsó kifejezés felírható úgy, hogy

$$\bar{n} = B\bar{\varrho}, \qquad (31)$$

vagy

$$\begin{bmatrix} h \\ k \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_b l_c - k_c l_b & k_c l_a - k_a l_c & k_a l_b - k_b l_a \\ h_c l_b - h_b l_c & h_a l_c - h_c l_a & h_b l_a - h_a l_b \\ h_b k_c - h_c k_b & h_c k_a - h_a k_c & h_a k_b - h_b k_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ K \\ L \end{bmatrix}. \qquad (32)$$

Itt a $\bar{\varrho} = H\bar{a} + K\bar{b} + L\bar{c}$ vektort egy olyan segédvektorként kell felfogni, amelynek a segítségével a (HKL) hexagonális rendszerbeli síknak az $\bar{n}$ normálisa meghatározható. Mivel a korábbiakban megadtuk azokat az összefüggéseket, amelyekkel az irányok pólusai meghatározhatók, a felvetett problémát megoldottuk.

A számításra nagyon alkalmas, egyszerű összefüggéseket kapunk, ha ismét élünk azzal a kapcsolattal, amit a 3. ábrában vázoltunk. Ebben az esetben ugyanis a B tenzornak a mátrixa a következő:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{a}{c}\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}. \qquad (33)$$

Tehát, figyelembe véve a 3. ábrán vázolt kapcsolatot, egy hexagonális kristály (HKL) kristálytani síkjára az

$$\bar{n} = \left(H + \frac{K}{2}\right)\bar{e}_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}K\bar{e}_2 + \frac{a}{c}\frac{\sqrt{3}}{2}L\bar{e}_3$$

köbös rendszerbeli irány merőleges. Most is felvetődhetik az a probléma, hogy a (*hkl*) köbös rendszerbeli kristálytani síknak a megfelelőjét kell megadni. A feladatnak megfelelő összefüggés a (30) kifejezésből következik:

$$\bar{\varrho} = B^{-1} \cdot \bar{n}. \tag{34}$$

A 3. ábra szerinti koordináta kapcsolatnál pedig ez megfelel a

$$\begin{bmatrix} H \\ K \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c}{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ k \\ l \end{bmatrix} \tag{35}$$

kifejezésnek.

A hexagonális rendszer kristálytani síkjaira merőleges irányok pólusait viszont az alábbi egyenletekkel lehet kijelölni akkor, ha a 001 standard pólusábrát kell meghatározni:

$$x_P = \frac{H + \frac{K}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{a}{c}L + \sqrt{H^2 + K^2 + HK + \frac{3}{4}\left(\frac{a}{c}\right)^2 L^2}} \tag{36}$$

ill.

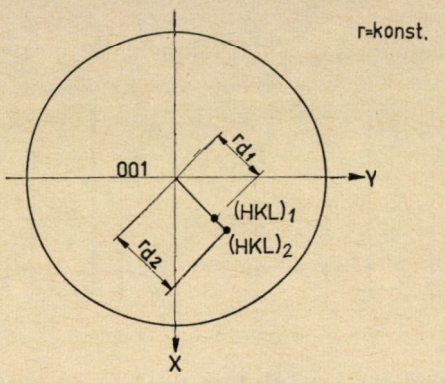
$$y_P = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}K}{\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{a}{c}L + \sqrt{H^2 + K^2 + HK\frac{3}{4}\left(\frac{a}{c}\right)^2 L^2}}. \tag{37}$$

Ennél a pólusábránál az x tengely az (100) az y tengely a ($\bar{1}20$) és a z tengely a (001) hexagonális rendszerbeli kristálytani síkokat megszabó póluson és az origón mennek keresztül.

Az 5. ábrában a hexagonális rendszer irányainak pólusait megadó standard 001 pólusábráját adtuk meg $c/a = 1{,}633$ tengelyarányra. A 6. ábra pedig ugyanennek a rendszernek a kristálytani síkjaira vonatkozó 001 pólusábrát mutatja.

Minden hexagonális rendszerre vonatkozó pólusábra adott c/a hányadosra vonatkozik. A különböző c/a hányadosú, de 001 pólusábrákban az azonos *HKL* kristályelemek a középponthól húzott azonos egyenesre illeszkednek. Ezt mutatja a 7. ábra a hexagonális rendszer két azonos (*HKL*) indexű, de

különböző c/a hányadosú kristályának síkjaira. Az ábrában $(HKL)_1$ jelenti a $(c/a)_1$ és a $(HKL)_2$ a $(c/a)_2$ hányadosú kristály szóban forgó síkjainak a pólusait. Ezért abban az esetben, ha egy bármilyen $(c/a)_1$ hányadosú 001 pólusábra adott — még az itt ismertetett számításnál is gyorsabban — a tetszőleges c/a hányadosú, de szintén 001 pólusábra — rendkívül könnyen átrajzolható.



7. ábra

Egy (HKL) kristálytani irány pólusának a távolsága az origótól $(c/a)_1$ hányados esetében:

$$r_{d_1} = \sqrt{x_{d_1}^2 + y_{d_1}^2} = \frac{\sqrt{H^2 + K^2 - HK}}{\left(\frac{c}{a}\right)_1 L + \sqrt{H^2 + K^2 - KH + \left(\frac{c}{a}\right)_1^2 L^2}} . \tag{38}$$

Az ugyanilyen indexű, de $(c/a)_2$ hányadosú pólus távolsága pedig szintén ez utóbbi egyenletből határozható meg, de értelemszerűen akkor $(c/a)_2$-t kell helyettesíteni. Így az új kristályra vonatkozó 001 pólusábrában csak annyi a változás, hogy az eredeti r_{d_1} távolság

$$r_{d_2} = r_{d_1} \cdot \frac{\left(\frac{c}{a}\right)_1 L + \sqrt{H^2 + K^2 - HK + \left(\frac{c}{a}\right)_1^2 L^2}}{\left(\frac{c}{a}\right)_2 L - \sqrt{H^2 + K^2 - HK + \left(\frac{c}{a}\right)_2^2 L^2}} . \tag{39}$$

Hasonló meggondolással a kristálytani síkok pólusainak az r_s távolságát is megadhatjuk. Azaz

$$r_{s_2} = r_{s_1} \cdot \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\frac{a}{c}\right)_1 L + \sqrt{H^2 + K^2 + HK + \frac{3}{4}\left(\frac{a}{c}\right)_1^2 L^2}}{\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\frac{a}{c}\right)_2 L + \sqrt{H^2 + K^2 + KH + \frac{3}{4}\left(\frac{a}{c}\right)_2^2 L^2}} . \tag{40}$$

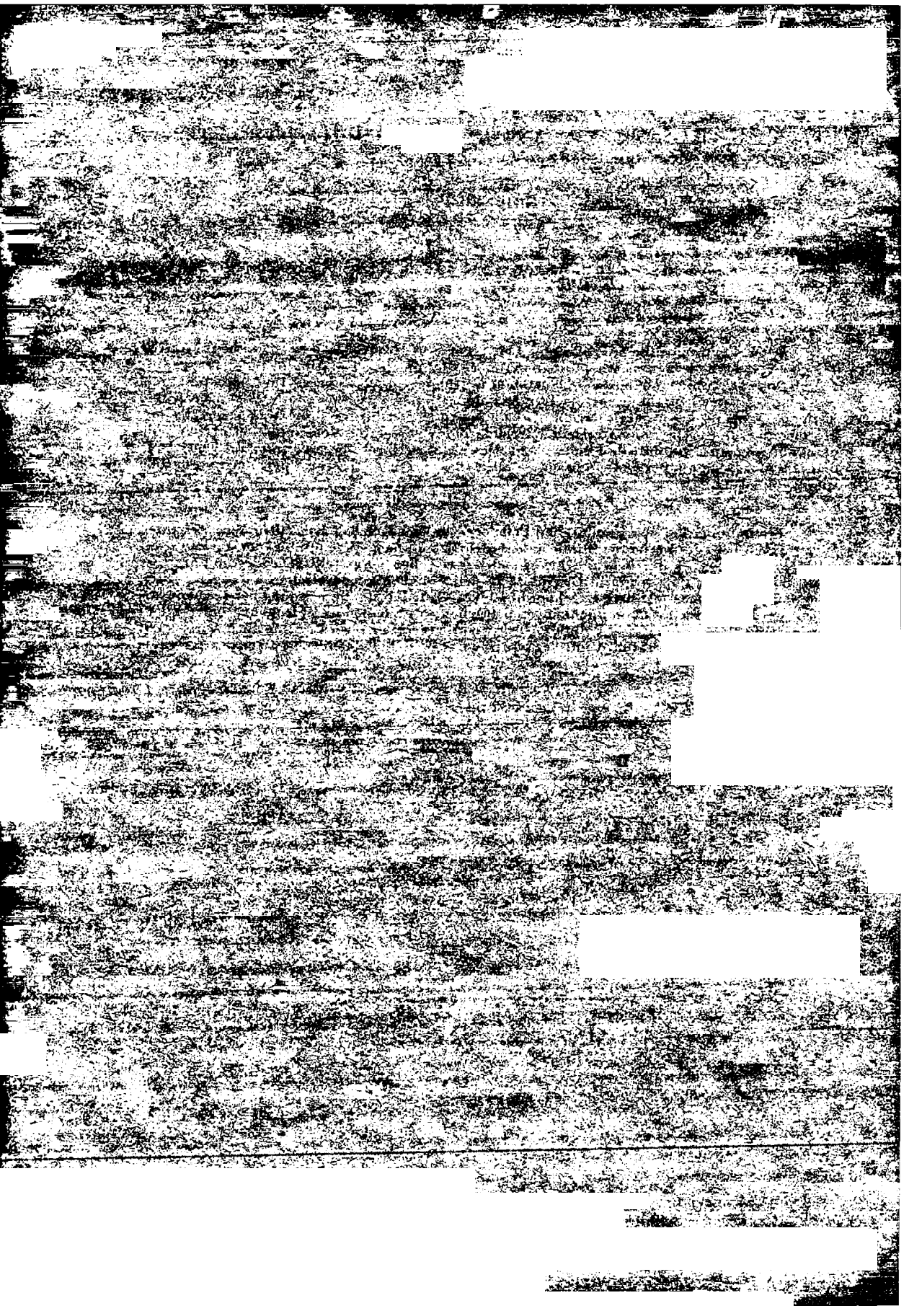
Itt r_{s_2} a $(c/a)_2$ új, r_{s_1} pedig az ismert $(c/a)_1$ hányadosú (HKL) indexű sík pólusának az origótól mért távolságát jelenti.

IRODALOM

1. BARRETT, C. S.: Structure of Metals, McGraw-Hill Co., 1952.
2. CULLITY, B. D.: Elements of X-ray Diffraction, addison-Wesley publ. London 1959.
3. ANDREWS, K. W.—DYSON, D. J.—KEOWN, S. R. Adam Hilger ltd., London 1971.
4. PROHÁSZKA J.: *Kohászati lapok*, **103** (1970), 59.

Determination of the Stereographic Pole Figures of Hexagonal Crystals, without Plotting
The paper presents a method whereby an extremely simple determination of the stereographic pole figures of cubic and hexagonal crystals is feasible. Indication of the individual pole positions is, instead of the usual plotting technique, by two position coordinates measurable in the basic plane. For the calculation of these position coordinates some simple correlations are introduced, by the computerized determination whereof the determination of the pole diagram is greatly simplified. Finally, a method is described whereby from the 0001 pole diagram of a hexagonal crystal of given c/a ratio any optional axial ratio pole diagram can be simply replotted.

Bestimmung der steregraphischen Polbilder von hexagonalen Kristallen ohne Zeichnen
In der Arbeit wird ein Verfahren für die außerordentlich einfache Bestimmung der stereographischen Polbilder von kubischen und hexagonalen Kristallen vorgestellt. Die Bestimmung der Lage der einzelnen Pole wird, im Gegensatz zu den üblichen zeichnerischen Lösungen, durch zwei in der Basisebene meßbare Lagekoordinaten ersetzt. Für die Berechnung der Lagekoordinaten werden einfache Zusammenhänge angegeben, durch deren Berechnung mit einem Rechner die Bestimmung des Polbildes bedeutend vereinfacht wird. Schließlich wird auch ein solches Verfahren vorgeführt, mit dessen Hilfe das 0001 Polbild eines hexagonalen Kristalls mit gegebenem Verhältnis c/a sehr einfach in ein Polbild mit beliebigem Achsenverhältnis umgezeichnet werden kann.



HOLTIDŐS SZABÁLYOZÁSI KÖRÖK TERVEZÉSE AZ IDŐTARTOMÁNYBAN

KEVICZKY LÁSZLÓ*
és
CSÁKI FRIGYES**
AZ MTA LEVELEZŐ TAGJA

[Beérkezett 1971 július 17-én]

Vizsgálatainkban I és PI szabályozókat illesztettünk ideális, egy- és kéttárolós holtidős szabályozott szakaszokhoz. Bemutatunk egy módszert a túllendülés értékének számítására. A digitális számítógépen kapott eredményeket diagram formájában közöljük. Foglalkozunk a holtidős körök négyzetes integrálkritérium alapján történő optimalizálásával is, az eredményeket szintén diagramokban közöljük. Közelítő összefüggéseket állapítunk meg a szabályozási időnek a rendszer paraméterekről való függésére. A kapott eredmények hasznosan alkalmazhatók lineáris, egyhurkos holtidő szabályozási körök tervezésére.

Bevezetés

Holtidős szabályozási körök átmeneti folyamatainak megítélésével foglalkozó cikket meglehetősen keveset találunk a szakirodalomban. Az eddigi vizsgálatok legtöbbször a stabilitás kérdését tárgyalták különböző struktúrájú rendszerekben, valamint megpróbáltak összefüggéseket keresni a frekvencia- és az időtartománybeli minőségi jellemzők között.

Az időtartománybeli közvetlen vizsgálatot JA. Z. CIPKIN ötlete nyomán szokták elvégezni [7]. Ezekben a cikkekben sajnálatos módon az általánosságra való törekvés legtöbbször a hasznosság rovására ment; ugyanis az időfüggvényekre körülményesen levezetett zárt összefüggések és képletek vizsgálatával nem kaptak több információt a holtidős rendszerekről, mint amennyit már amúgy is tudtunk [8].

Mindezen eredmények ismeretében, a problémakörnek a túllendülés vizsgálatára való leegyszerűsítésével a tervezési munkát nagymértékben elősegítő diagramokat dolgoztunk ki az egyhurkos, lineáris, holtidős rendszerek néhány alaptípusára.

Megvizsgáltuk továbbá a holtidős rendszerek egyszerűbb struktúráira a négyzetes integrálkritérium alapján történő optimálizálás kérdéseit; egyrészt a közvetlen időtartománybeli vizsgálatokra támaszkodva, másrészt a Parseval-tétel segítségével a frekvenciatartományon keresztül. Az optimális beállításokra szintén diagramokat közlünk.

* Dr. Keviczky László, Budapest VII., Damjanich u. 25/a
** Prof. Dr Csáki Frigyes, Budapest V., Váci u. 8.

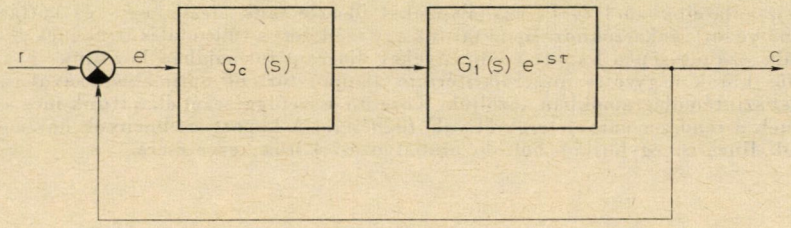
Végül szimulációs eredmények alapján közelítő összefüggéseket adunk meg egyszerű holtidős körök szabályozási idejének számítására.

1. Diagramok egyszerű holtidős szabályozási körök túllendülésére

Legyen a vizsgált szabályozási kör az 1. ábra szerinti, ahol $G_c(s)$ — a szabályozó, $G_1(s)e^{-s\tau}$ — pedig a szabályozott szakasz átviteli függvénye.

A felnyitott kör átviteli függvénye:

$$G(s) = G_c(s)\, G_1(s)\, e^{-s\tau}. \tag{1.1}$$



1. ábra

A hibaátviteli függvény a következő:

$$W_e(s) = \frac{1}{1+G(s)}. \tag{1.2}$$

Az (1.2) konvergens geometriai sorba fejthető, ha $|G(j\omega)| < 1$. Ez a nagyfrekvenciás tartományban általában valóban teljesül, így a hibaátmeneti függvény kezdeti szakaszát (1.2)-ből meg tudjuk határozni. A mondottak szerint tehát:

$$W_e(s) = \frac{1}{1+G(s)} = 1 - G + G^2 - G^3 + G^4 - \ \ldots\ \pm G^i \pm\ \ldots\ . \tag{1.3}$$

A részletes vizsgálatok megmutatták, hogy a $t = 0$ érték körüli konvergencia azt jelenti, hogy az (1.3) sor első n tagja pontosan meghatározza a hibafüggvény $[0, n\tau]$ tartománybeli viselkedését. (Ugyanez természetesen a szabályozott jellemzőre is fennáll, de a hibajelre az összefüggések egyszerűbbek.) Az (1.3) sor tagjaiban ugyanis szerepel az $e^{-i\tau s}$ szorzótényező, amely az inverz $\mathcal{L}$-transzformáció elvégzésekor az eltolási tétel értelmében azt jelenti, hogy a sor i-edik tagja a megelőző tagokhoz tartozó időfüggvényeket már nem befolyásolja. Ez lényeges különbséget jelent (1.3) értelmezésében a nem holtidős rendszerekhez képest.*

* Az (1.3) sor konvergenciafeltételeit részletesen WUNSCH vizsgálta meg Moderne Systemtheorie című könyvében.

A továbbiakban ideális holtidős taghoz illesztett *I* és *PI*, valamint egytárolós holtidős taggal összekapcsolt *I* szabályozó esetén kialakult szabályozási kör túllendülését fogjuk meghatározni a paraméterek függvényében.

1.1 *I-szabályozóval kompenzált holtidős tag*

Először a tiszta holtidős tagot *I*-szabályozóval vizsgáljuk, mert az a legegyszerűbb eset, és erre a legkönnyebb elvi megfontolásokat kidolgozni. Ebben az esetben egységugrás bemenetre

$$G_c(s) = \frac{1}{sT_1}, \quad G_1(s) = 1 \quad \text{és} \quad R(s) = \frac{1}{s}.$$

A hibajel $\mathfrak{L}$-transzformáltja (1.1) és (1.3) alapján

$$E(s) = \mathfrak{L}\{e(t)\} = \frac{1}{s} W_e(s) = \frac{1}{s} - \frac{e^{-s\tau}}{s^2 T_1} + \frac{e^{-2s\tau}}{s^3 T_1^2} - \ldots$$

$$\ldots + (-1)^i \frac{e^{-is\tau}}{s^{i+1} T_1^i} + \ldots . \qquad (1.4)$$

Tehát

$$y = e(t) = \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^i F_i(t - i\tau)\, 1(t - i\tau), \qquad (1.5)$$

ahol

$$F_i(t) = \frac{t^i}{i!\, T_1^i} \qquad (1.6)$$

és az $1(t)$ egységugrást jelent.

Általában az $(i + 1)$-edik $[i\,\tau \leq t \leq (i + 1)\tau]$ tartományban érvényes y_{i+1} meghatározása az

$$y_{i+1} = y_i + (-1)^i F_i(t - i\tau)\, 1(t - i\tau);\ y_0 = 0 \qquad (1.7)$$

rekurzív képlettel történhetik.

Vezessük be az

$$x = \frac{t}{\tau} \quad \text{és} \quad m = \frac{\tau}{T_1}. \qquad (1.8)$$

dimenzió nélküli változókat. Így kapjuk, hogy:

$$y_1(x) = 1, \qquad \text{ha } 0 \leq t \leq \tau$$

$$y_2(x) = -mx + (1 + m), \qquad \text{ha } \tau \leq t \leq 2\tau$$

$$y_3(x) = \frac{1}{2} m^2 x^2 - mx(1 + 2m) + (1 + m + 2m^2) \qquad \text{ha } 2\tau \leq t \leq 3\tau$$

$$y_4(x) = -\frac{1}{6} m^3 x^3 + \frac{1}{2} m^2 x^2(1+3m) - \tag{1.9}$$

$$-\frac{1}{2} mx(2+4m+9m^2) +$$

$$+\frac{1}{2}(2+2m+4m^2+9m^3), \quad \text{ha} \quad 3\tau \leq t \leq 4\tau$$

Határozzuk meg a hibajel első minimumának helyét és a függvény értékét ebben a pontban. Az (1.9) időfüggvényekből látható, hogy az 1. és 2. intervallumba nem kerülhet szélső érték. Ha a 3. intervallumba kerül minimum, annak helye az $y_3'(x_3) = 0$ feltételből:

$$x_3 = 2 + \frac{1}{m} = 2 + \frac{T_I}{\tau}, \tag{1.10}$$

és nagysága

$$y_3(x_3) = \frac{1}{2} - m = \frac{1}{2} - \frac{\tau}{T_I}. \tag{1.11}$$

A stabilitás határát, valamint az (1.7)-tel kapcsolatban mondottakat figyelembe véve az (1.10) és (1.11) csak a

$$\frac{2}{\pi}\tau \leq T_I \leq \tau \tag{1.12}$$

tartományban érvényes. (Mint ismeretes az I szabályozóval kompenzált holtidős szakasz esetén a kritikus integrálási idő: $T_{Ikr} = (2/\pi)\tau$.)

A 4. intervallumba eső minimum helye

$$x_4 = \frac{1}{m} + 3 - \sqrt{\frac{2}{m}\left(1 - \frac{1}{2m}\right)}. \tag{1.13}$$

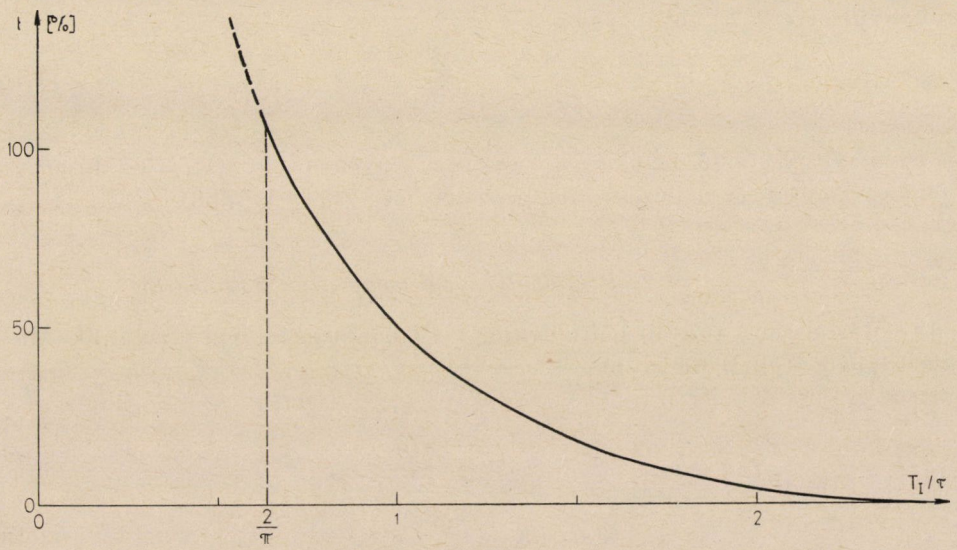
A függvény $y_4(x_4)$ helyettesítési értéke, mint látható, már csak bonyolultan számítható (1.9) alapján. Most és a következőkben is (1.3)-nak csak az első négy tagját fogjuk figyelembe venni, mivel magasabb fokszámú tagoknál a módszer már elveszti egyszerűségét és szemléletességét, másrészt a gyakorlatban ez a közelítés legtöbbször megengedhető (lásd később).

Az (1.13) érvényességének feltétele

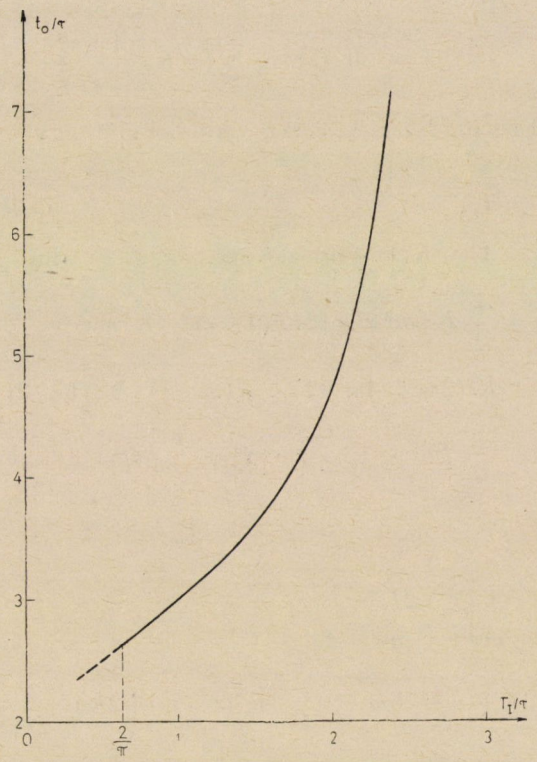
$$\tau \leq T_I \leq \tau \frac{2+\sqrt{2}}{2}. \tag{1.14}$$

A 2. ábrán az (1.10), (1.11), (1.13) és (1.9) alapján készült diagramot láthatunk a szabályozott jellemző

$$l = 1 - y_i(x_i) \tag{1.15}$$



2. ábra



3. ábra

túllendülésére, a 3. ábrán pedig a

$$\frac{t_0}{\tau} = \frac{x_i}{\tau} \tag{1.16}$$

normalizált csúcsidő értékére a T_I/τ függvényében. Az (1.14)-en kívül eső néhány pontot modellezéssel határoztuk meg (lásd később).

1.2. *PI-szabályozóval kompenzált holtidős tag*

Másodszor a tisztán holtidős tagot *PI* kompenzációval vizsgáljuk. Ha a szabályozó átviteli függvénye

$$G_c(s) = K\frac{1+sT_I}{sT_I}, \tag{1.17}$$

ebben az esetben

$$G(s) = K\frac{1+sT_I}{sT_I}e^{-s\tau}. \tag{1.18}$$

Ismét az (1.3) szerinti sorbafejtést alkalmazva, a hibajel $\mathfrak{L}$-transzformáltjára kapjuk $[R(s) = 1/s]$:

$$E(s) = \mathfrak{L}\{e(t)\} = \frac{1}{s}W_e(s) = \sum_{i=0}^{\infty}(-K)^i\frac{1+sT_I}{sT_I}\frac{1}{s^{i+1}}e^{-is\tau}. \tag{1.19}$$

Az 1.1. pontban leírt módszert követve a hibajel időfüggvényének az első négy tartományra érvényes alakja:

$$\begin{aligned}
y_1(x) &= 1, && \text{ha } 0 \leq t < \tau,\\
y_2(x) &= 1 - K(1-m) - Kmx, && \text{ha } \tau \leq t < 2\tau,\\
y_3(x) &= \frac{1}{2}K^2m^2x^2 + [2K^2(1-m) - K]mx + \\
&\quad + K^2(2m^2 - 4m + 1) + K(m-1) + 1, && \text{ha } 2\tau \leq t < 3\tau,\\
y_4(x) &= \frac{1}{6}fm^3x^3 + \frac{1}{4}gm^3x^2 + \frac{1}{2}hm^3x + d, && \text{ha } 3\tau \leq t < 4\tau,
\end{aligned} \tag{1.20}$$

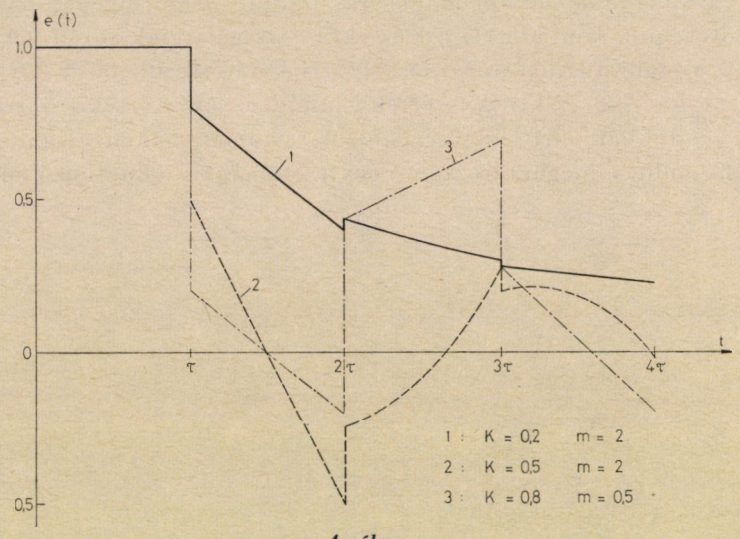
ahol

$$\begin{aligned}
f &= -K^3,\\
g &= 6K^3\left(1 - \frac{1}{m}\right) + \frac{2K^2}{m},\\
h &= -\frac{1}{m^2}[3K^3(3m^2 - 6m + 2) - 4K^2(1-m) + 2K],\\
d &= K^3(4.5m^3 - 13.5m^2 + 9m - 1) + K^2(2m^2 - 4m + 1) - K(1-m) + 1.
\end{aligned} \tag{1.21}$$

A hibaátmeneti függvényt itt is tartományonként külön vizsgáljuk. Az egyes intervallumok határán a $t = \tau$, 2τ, 3τ, 4τ, ... stb. pontokban a szabályozó arányos része ugrást okoz a függvényben. Ennek abszolút értéke az i-edik határponton ($t = i\tau$-nál) K^i, előjele pedig a negatív visszacsatolás miatt $(-1)^i$ szerint változik.

Így a tartományon belüli minimumokon kívül a páros sorszámú határoknál a balról, páratlan sorszámúaknál a jobbról felvett függvényértéket is figyelembe kell vennünk a minimum keresésekor.

Az elmondottak illusztrálására a 4. ábrán egy aperiodikus és két lengő lefolyású átmeneti függvényt mutatunk be.



4. ábra

Tartománybeli minimuma csak az $y_3(x)$ és $y_4(x)$ függvénynek lehet:

a) Az előbbi minimumának helye az $y_3'(x) = 0$ egyenlet megoldása:

$$x_3 = 2 + \frac{1-2K}{mK}, \tag{1.22}$$

a minimum értéke: $y_3(x_3)$.

b) Az $y_4(x)$ függvény szélsőértékeit az $y_4'(x) = 0$ másodfokú egyenlet gyökei határozzák meg. Számunkra csak a nem negatív diszkriminánshoz tartozó megoldások érdekesek, de ezek közül is csak a minimumhoz tartozó. Esetünkben — mivel a harmadfokú tag előjele negatív — ez a kisebbik gyök ($f < 0$ miatt):

$$x_4 = \frac{-g + \sqrt{g^2 + 4fh}}{2f}, \tag{1.23}$$

a függvény értéke: $y_4(x_4)$.

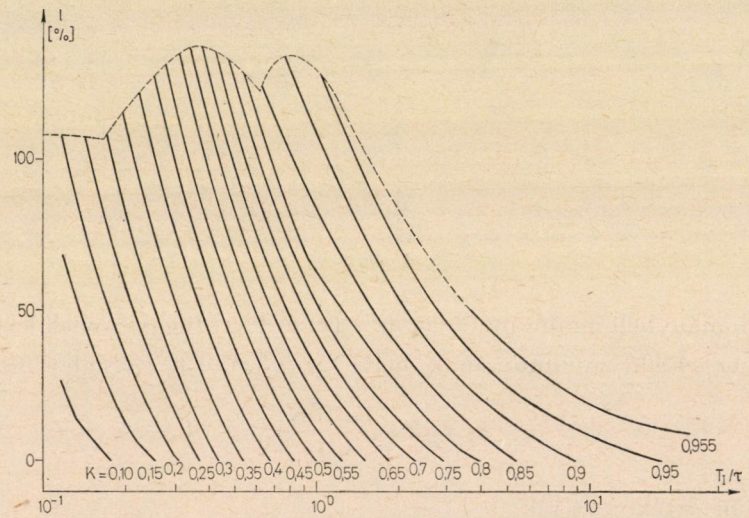
c) A határokról elmondottak szerint $x = 2 - t$ a 2. intervallumból, balról kell megvizsgálnunk. Itt a függvényérték:

$$y_2(2) = 1 - K(1 + m). \tag{1.24}$$

Hasonlóképpen $x = 4$-et a negyedik tartományból vizsgáljuk, ahol $y_4(4)$-t kell képezni.

d) A függvény értékét az $x = 3$ határon a 4. intervallumból csak akkor kell meghatározni, ha x_4 valós és $x_4 < 3$, mert egyébként $y_4(x_4) < y_4(3)$, ha $x_4 < 3$.

A vázolt problémák megoldására digitális számítógépet használtunk. Az elkészített program adott T_I/τ értékre (vizsgálataink során 0,05 ÷ 20-ig) kiszámítja a stabilitás határát adó kritikus körerősítést, majd K-t 0-tól 0,05 lépésenként növelve, a kritikus értékig minden egyes értékre sorra veszi az *a*, *b* , *c*, *d* pontokban leírt lehetőségeket. A tartományonkénti legkisebb értéke ket összehasonlítva meghatározza a négy tartományra vonatkozó minimumot-



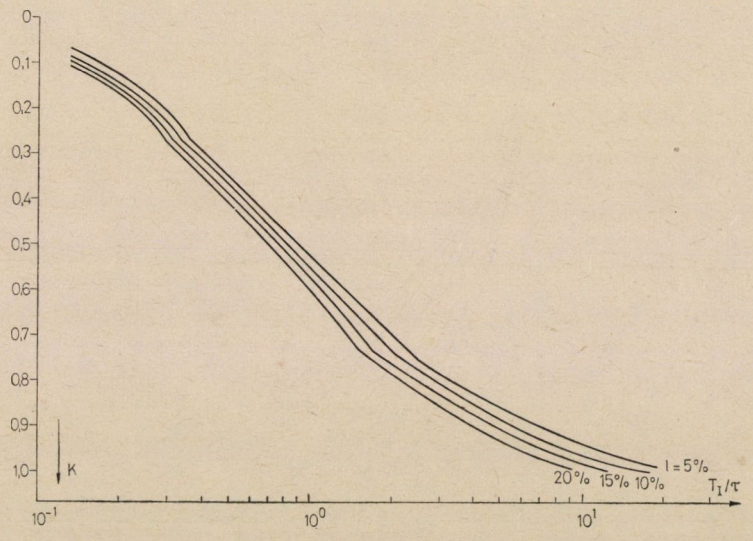
5. ábra

A számítás eredményeit az 5. ábra diagramja foglalja össze. Itt T_I/τ függvényében az l százalékos túllendülést ábrázoltuk K-val paraméterezve. A szaggatott vonal a stabilitás határát jelöli.

A leggyakrabban ajánlott 5, 10, 15 és 20%-os túllendülés értékekre külön diagramot készítettünk, amely a 6. ábrán látható.

A kapott görbék folytonosak, de a különböző tartományokra eltérő összefüggések és a határokon fellépő ugrások miatt törésekkel rendelkeznek.

Azok a paraméterkombinációk, amelyek a csúcsidő helyét az első négy intervallumon kívülre vinnék, csak igen kis K és igen nagy T_I/τ értékeknél érvényesülnek, így a kapott diagramok széles körben felhasználhatók.



6. ábra

1.3. *I-szabályozóval kompenzált egytárolós holtidős tag*

Már az eddigi vizsgálatok alapján is láthatjuk, hogy a rendszer felépítésének bonyolultságával az összefüggések egyszerűsége is nagymértékben csökken.

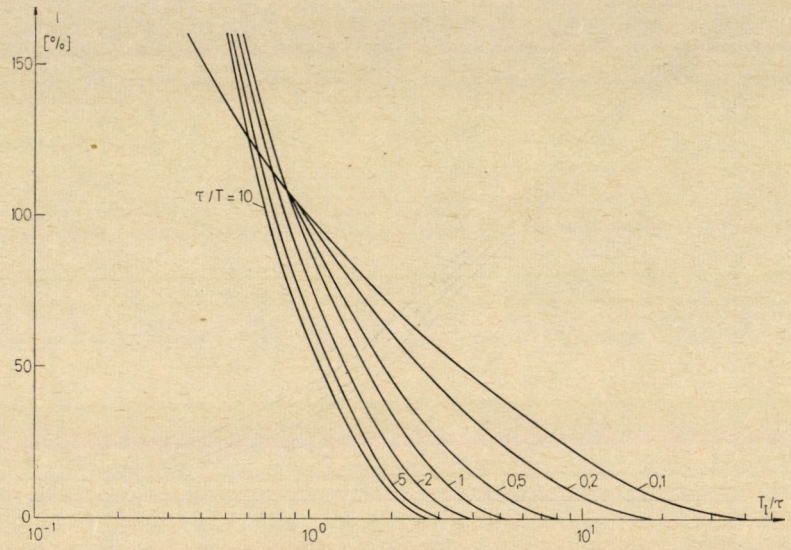
Hasonlóképpen problémát jelent az is, hogy több változó esetén igen nehéz meghatározni a paraméterek terében azt a tartományt, amely biztosítja, hogy a csúcsidő az első n számú figyelembe vett intervallumba essen. Ezért ez utóbbi esetben már digitális szimulációval határoztuk meg a túllendülésre vonatkozó diagramokat.

Az első ábrának megfelelő átviteli függvények itt:

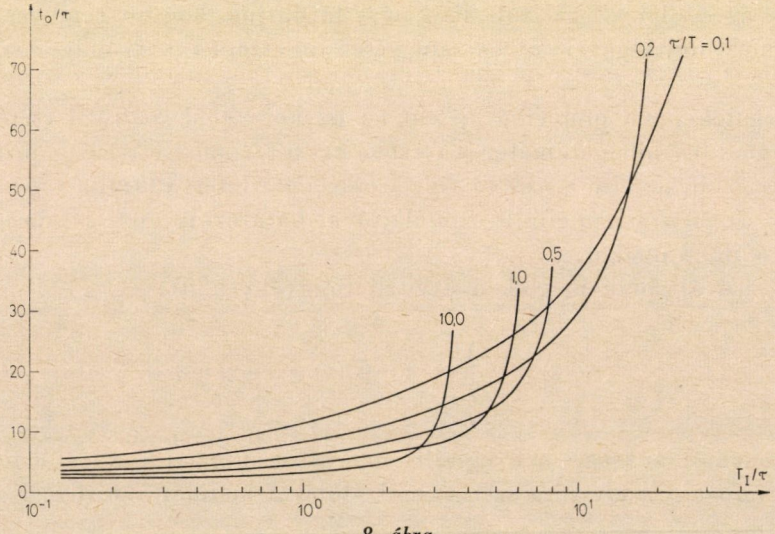
$$G_c(s) = \frac{1}{sT_I} \quad ; \quad G_1(s) = \frac{1}{1+sT} . \tag{1.25}$$

A szimulációhoz szükséges két digitális integrátor automatikus lépésközválasztással a Simpson-kvadratúra szerint működött. A holtidőt „shift-regiszterrel" modelleztük.

A szimuláció egy paraméterkombinációra mindaddig működött, amig a szabályozott jellemzőben csökkenés nem következett be. A program az így meghatározott I és t_0/τ értékek kiírása után új paraméterkombinációra tért át. (Az aperiodikus esetben bekövetkező végtelen ciklus elkerüléséhez természetesen a számítási időt korlátoztuk).

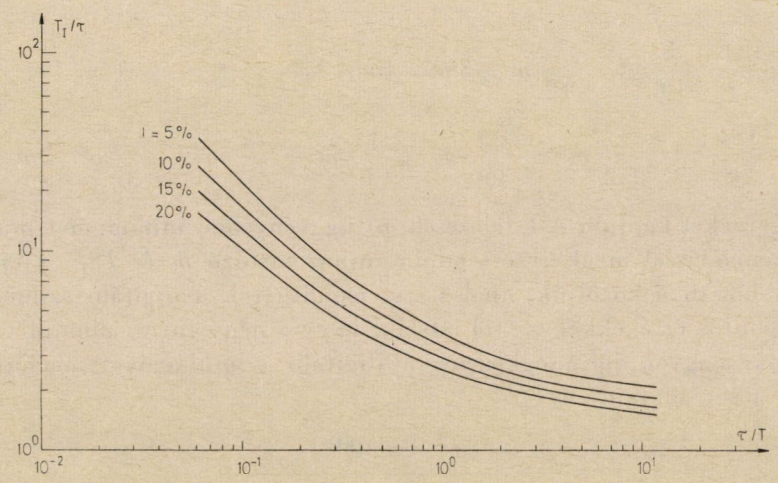


7. ábra



8. ábra

A számítások eredményeit a 7., 8., 9. ábra tartalmazza. A 7. ábrán a százalékos túllendülést ábrázoltuk T_l/τ függvényében és τ/T-ben paraméterezve. A 8. ábrán a csúcsidő relatív értékét (t_0,τ) mutatja ugyanazon változók függvényében. A 9. ábrán a tervezésre leginkább használt túllendülés értékekre készült diagramot láthatjuk.



9. ábra

2. Szabályozók beállítása a négyzetes integrálkritérium alapján

Az előző pontban leírt módszer segítségével tehát egyszerű, zárt alakban is elő tudjuk állítani a bemutatott holtidős rendszerek hibaátmeneti függvényét az első néhány intervallumra. Az eredményül kapott (1.9) és (1.20) összefüggések segítségével meghatározhatjuk az első $n\tau$ intervallumra a hibajel négyzetes integrálját, figyelembe véve azt a tényt, hogy a közelítés a hibajel első n tagjának figyelembevételével az első $n\tau$ intervallumra pontos eredményt ad. Közelítsük tehát a négyzetes integrálkritérium értékét a következőképpen:

$$\mathrm{ISE}_n = \int_0^{\infty} e^2(t)\,dt \cong \tau \sum_{i=1}^{n} \int_{i-1}^{i} y_i^2(x)\,dx, \tag{2.1}$$

ahol figyelembe vettük y_i korábbi definícióját, továbbá azt, hogy

$$\mathrm{ISE} = \int_0^{\infty} e^2(t)\,dt = \tau \int_0^{\infty} e^2(x)\,dx\,. \tag{2.2}$$

Alkalmazzuk a (2.1) összefüggést először az 1.1. pontbeli rendszerre. Ekkor az integrálásokat elvégezve az

$$\begin{aligned}
\frac{\mathrm{ISE}_1}{\tau} &= 1, \\
\frac{\mathrm{ISE}_2}{\tau} &= \frac{1}{3}m^2 - m + 2, \\
\frac{\mathrm{ISE}_3}{\tau} &= \frac{1}{10}m^4 - \frac{7}{12}m^3 + 3m^2 - 4m + 3, \\
\frac{\mathrm{ISE}_4}{\tau} &= \frac{1}{252}m^6 - \frac{49}{360}m^5 + \frac{11}{6}m^4 - \frac{27}{4}m^3 + \frac{35}{3}m^2 - 9m + 4,
\end{aligned} \tag{2.3}$$

összefüggéseket kapjuk. A kifejezések m függvényében minimumot mutatnak. A differenciálással megkeresett minimumhoz tartozó m és ISE_n/τ értékeket az I. táblázatban közöljük, ahol összehasonlíthatók a digitális szimulációval kapott pontos értékekkel is. Jól látszik, hogy a négy intervallumra való számítás már nagyon jól megközelíti a digitális szimulációval meghatározott ($n = \infty$)eset adatait.

I. táblázat

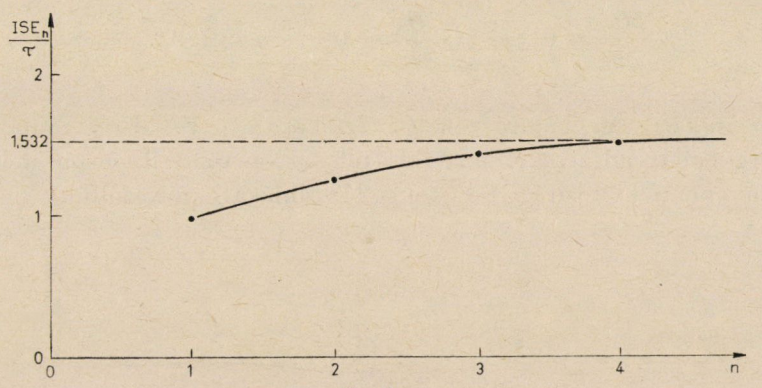
n	$m = \frac{\tau}{T_I}$	$\frac{\mathrm{ISE}_n}{\tau}$
1	—	1
2	1,5	1,25
3	0,87	1,43
4	0,751	1,50
∞	0,75	1,53

Az eredményekből kitűnik, hogy a tervezés — a túllendülés-számítás és az optimalizálás — céljaira elegendő a hibaátmeneti függvény első négy ntervallumba eső szakaszát figyelembe venni a vizsgált rendszerben. A közelítés jóságát a 10. és 11. ábrákból is megítélhetjük, ahol ISE_n/τ alakulását ábrázoltuk n és τ/T_I függvényében.

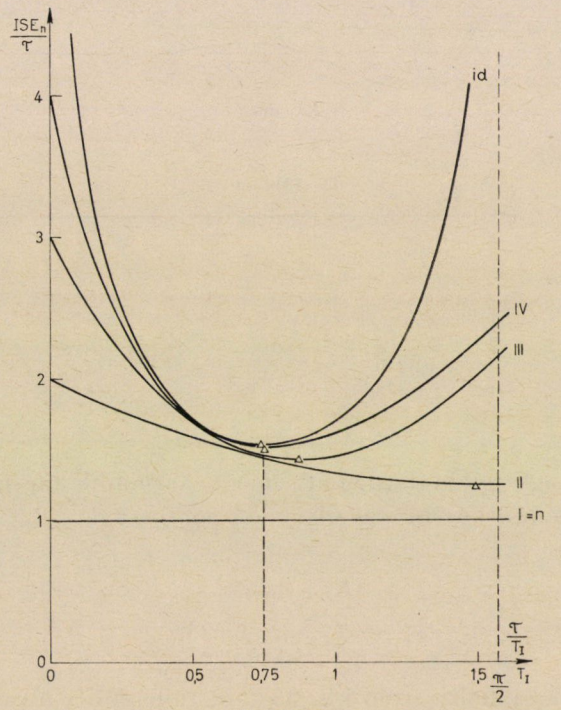
Az eddigiek szerint az ideális holtidős szabályozott szakaszhoz kapcsolt I szabályozó integrálási idejének optimális értéke a négyzetes integrál szempontjából:

$$T_{I\mathrm{opt}} = \frac{4}{3}\tau. \tag{2.4}$$

Megjegyezzük, hogy a négyzetes integrál minimumát biztosító rendszerek túllendülése elég nagy, mint azt a 12. ábrán be is mutatjuk, körülbelül 25%. Ezt az értéket a 2. ábra diagramjából ellenőrizhetjük.



10. ábra



11. ábra

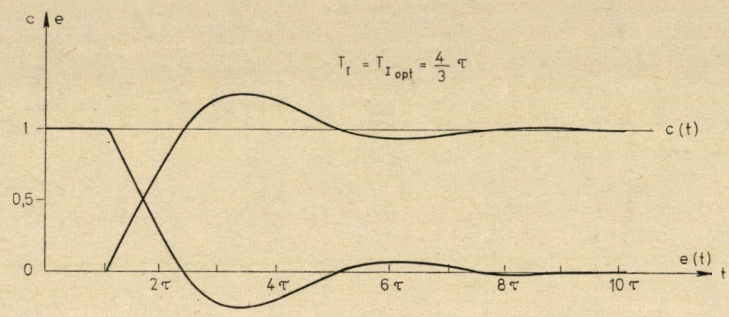
Az előbbi számítások az 1.2. pont alapján *PI* szabályozóval kompenzált tiszta holtidős tag esetén is végrehajthatók. Ekkor ISE_n két paraméternek, az m-nek és K-nak a nemlineáris függvénye. Így ISE_n minimalizálásához nemlineáris egyenletrendszereket kell megoldani, mégpedig

$$ISE_n = Q_n(m, K) \quad ; \quad n = 1, 2, \ldots \tag{2.5}$$

esetén a

$$\frac{\partial Q_n}{\partial m} = 0 \quad \text{és} \quad \frac{\partial Q_n}{\partial K} = 0 \quad ; \quad n = 1, 2, \ldots \tag{2.6}$$

egyenletrendszert. Meghatároztuk Q_n értékét $n = 1 - 4$-re, majd a (2.6) szerinti egyenletrendszereket megoldottuk a Newton—Raphson módszerrel. A Q_n minimumát biztosító értékeket a II. táblázatban közöljük.



12. ábra

II. táblázat

n	$m = \frac{\tau}{T_I}$	K	$\frac{ISE_n}{\tau}$
1	—	—	1
2	0	1	1
3	1,5749	0,50	1,075
4	1,575	0,50	1,088

Látható, hogy gyakorlatilag itt már a harmadik tag figyelembevétele, tehát a harmadrendű közelítés is elegendő pontosságot ad. Az optimális szabályozó adataival

$$K_{\text{opt}}\, 0.5\,, \tag{2.7}$$
$$T_{I\text{opt}} = 0.635\,\tau\,,$$

Az 5. ábra diagramjából szintén kb. 25%-os túllendülés olvasható ki.

A tanszéken kidolgozott és [2]-ben ismertetett számítógépes programcsomag lehetővé teszi holtidős rendszerek optimalizálását is, a négyzetes integrálkritérium alapján. Ha a szabályozási kör tagjai koncentrált paraméterűek, és így a hibajel $\mathfrak{L}$-transzformáltja racionális törtfüggvény, akkor *ISE* értékét a rendszer paramétereiből alkotott lineáris egynletrendszer megoldásaként kapjuk [1]. Amennyiben a szabályozási kör holtidőt is tartalmaz, *ISE* értékét a Parseval-tétel alapján közvetlenül a frekvenciatartományban numerikus integrálással számítjuk ki. Az egyik elkészült programunk a Romberg-

kvadratúra felhasználásával így működik, viszont ebben az esetben egy egyszerűbb struktúrájú rendszer optimalizálása is igen hosszú ideig tartott, tehát a program segítségével szabályozók beállítására szolgáló diagram kidolgozására nem gondolhattunk [2]. A számítási idő csökkentése érdekében a holtidőt tartalmazó tagot a PADE-közelítés szerint negyedrendű racionális törtfüggvénnyel helyettesítettük:

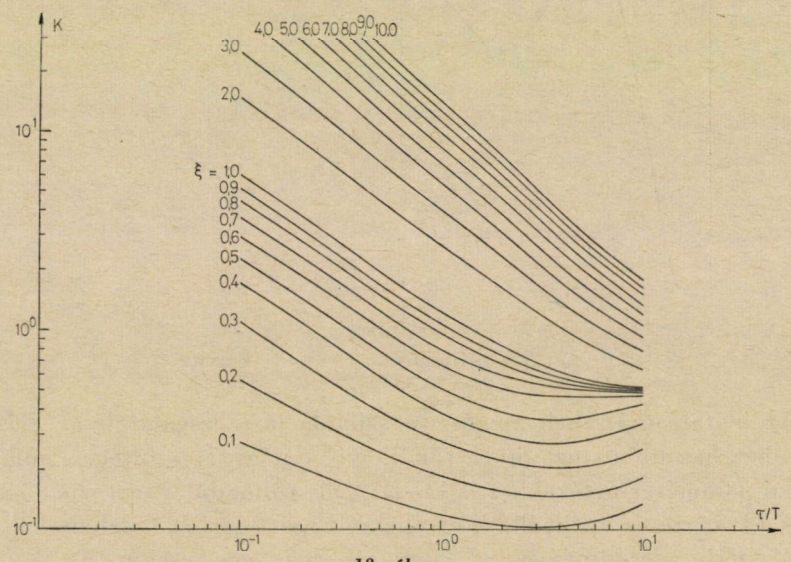
$$e^{-s\tau} = \frac{1 - \frac{1}{2}s\tau + \frac{9}{84}s^2\tau^2 - \frac{1}{84}s^3\tau^3 + \frac{1}{1680}s^4\tau^4}{1 + \frac{1}{2}s\tau + \frac{9}{84}s^2\tau^2 + \frac{1}{84}s^3\tau^3 + \frac{1}{1680}s^4\tau^4} \tag{2.8}$$

formában. Így a programrendszer egy másik tagját használhattuk fel, amelyben a hibajel $\mathfrak{L}$-transzformáltját racionális törtfüggvény alakjában kell megadni [2]. A program segítségével diagramot dolgoztunk ki kéttárolós holtidős taghoz illesztett *PI* szabályozó paramétereinek optimális beállítására. A 13. ábrán az optimális K, a 14. ábrán az optimális T_I/T értékekre készült diagramokat közöljük a τ/T függvényében és ζ-ben paraméterezve. Itt feltételeztük, hogy a szabályozó átviteli függvénye

$$G_c(s) = K\left(1 + \frac{1}{sT_I}\right), \tag{2.9}$$

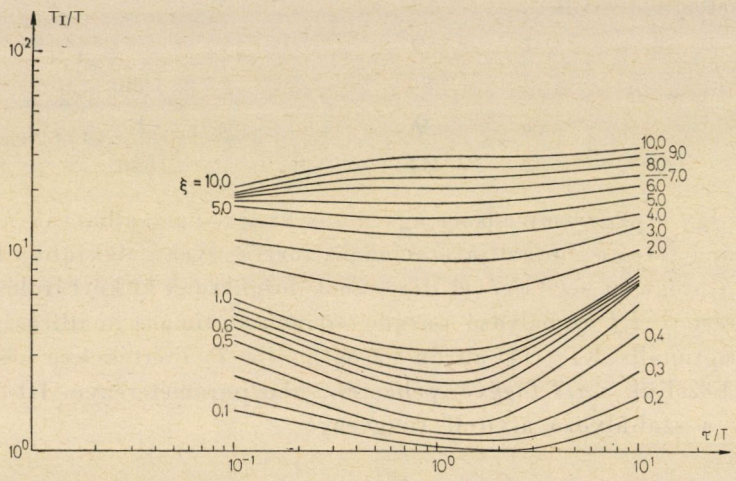
a szabályozott szakaszé pedig

$$G_p(s) = \frac{e^{-s\tau}}{1 + 2\zeta Ts + T^2s^2} \tag{2.10}$$

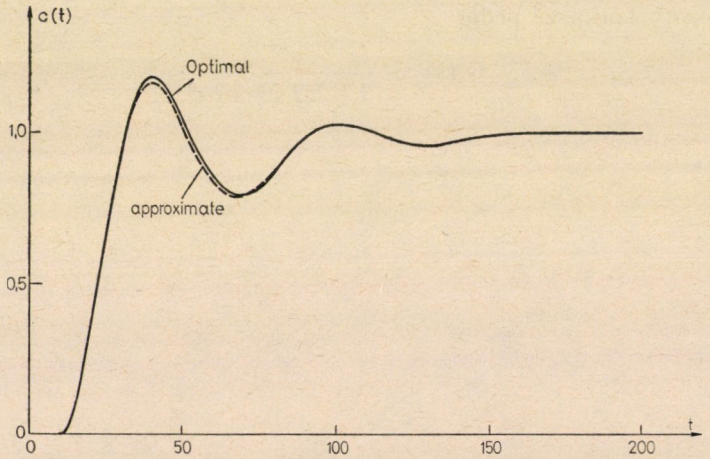


13. ábra

alakú. Megjegyezni kívánjuk, hogy a gyakorlatban csak ritkán fordul elő (2.10)-nél bonyolultabb, tehát többtárolós szabályozott szakasz. Másrészt holtidős tagokat, mint ismeretes, leginkább *I* vagy *PI* szabályozóval szoktak kompenzálni. Így a tárgyalt eset a gyakorlat szempontjából elég általánosnak tekinthető.



14. ábra



15. ábra

——— = optimális, — — — = közelítő

Az időtartománybeli kiegészítő szimulációs vizsgálatok az előző eredményekhez hasonlóan azt mutatták, hogy a négyzetes integrál minimumát biztosító paraméter-értékekhez is kb. 25%-os túllendülés tartozik.

A 13. ábrán az optimális K értékekre kapott görbék összhangban vannak a (2.7) szerinti eredményekkel, ugyanis $\tau/T \to \infty$ esetén $K_{opt} \to 0{,}5$-höz.

A számításokhoz alkalmazott (2.8) közelítésről megjegyezzük, hogy azt a lehetséges közelítések közül [9] összehasonlító vizsgálatai és ajánlása alapján választottuk. Az aproximáció jóságát egyébként mind a frekvencia — mind pedig az időtartományban ellenőriztük és azt jónak találtuk. A (2.8) szerinti PADE-közelítésnek a valódi holtidős rendszerhez képest különösen kicsiny a hibája az optimális beállítások szempontjából, mint azt a 15. ábrán szemléltetjük. Itt a $\tau/T = 1$ és $\zeta = 1$ értékeknél a diagramokból leolvasott $K_{opt} = 1{,}21$ és $T_{Iopt} = 32{,}0$ értékekre kapott közel optimális átmeneti függvényt hasonlíthatjuk össze a valódi optimális jellel. Ez utóbbit egy hibrid üzemű digitális szimulációt alkalmazó optimalizáló számítógépes program segítségével kaptuk.

3. Közelítő összefüggések a szabályozási idő számítására

Felhasználva azt a körülményt, hogy aktív kísérleti tervek segítségével valamely folyamat elég pontos matematikai leírását meghatározhatjuk egy munkapont környezetében, közelítő összefüggéseket állíthatunk fel szabályozási körök minőségi jellemzőinek alakulására a paraméterek függvényében.

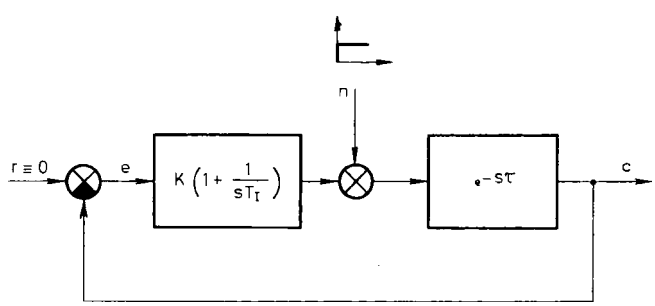
Az alkalmazott módszernél egy megadott munkapont környezetében a tervezett kísérletek elméletéből adódó pontokban megmértük a szabályozási idő értékét, majd regressziós számítás segítségével meghatároztuk annak a rendszerparaméterektől való függését. A számításokban a kapcsolatot teljes kvadratikus alakzatként építettük fel.

Vizsgálatainkban szimulációs programrendszer segítségével holtidős körök szabályozási idejét vizsgáltuk.

Az első esetben, az 1. ábra jelöléseinél maradva

$$G_c(s) = K\left(1 + \frac{1}{sT_I}\right), \quad G_1(s) = 1 \quad \text{és} \quad N(s) = 1. \tag{3.1}$$

volt. A rendszert a 16. ábra szerint képzeltük el. A szabályozási időt az $n(t) = 1(t)$ zavarójel hatására létrejött hibajelnél vizsgáltuk a 17. ábrán látható definícióval.



16. ábra

A $K = 0{,}3$ és $T_c/\tau = 0{,}4$ munkapont környezetében meghatároztuk a t_c/τ relatív szabályozási időre vonatkozó kvadratikus polinomot:

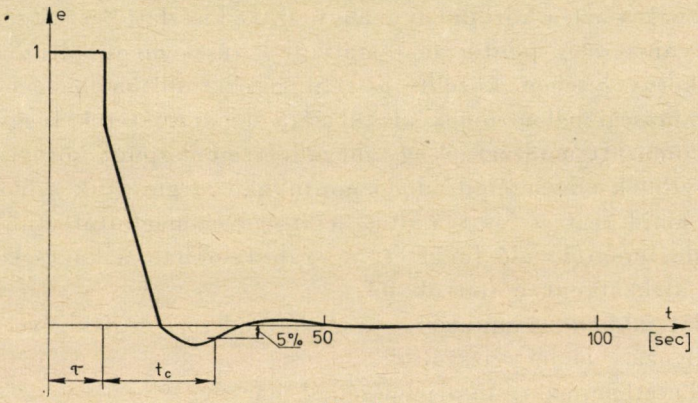
$$t_c/\tau = 178.5 - 297.8K - 368T_I/\tau - 250KT_I/\tau + 666.7K^2 + 562.5T_I^2/\tau^2, \quad (3.2)$$

amelynek minimális értékét a

$$K_{\text{opt}} = 0.297 \quad \text{és} \quad T_{I\,\text{opt}} = 0.393\tau \quad (3.3)$$

biztosítja. (A minimumot a t_c/τ-nak K és T_I/τ szerinti deriválásából kaptuk).

$\tau = 10$ sec-nál a (3.3)-nak megfelelő időfüggvényt $r(t) = 1(t)$ esetén a 17. ábrán látjuk. Az ábra az $n(t) = 1(t)$ esethez képest csupán τ-val történő késleltetésben különbözik.



17. ábra

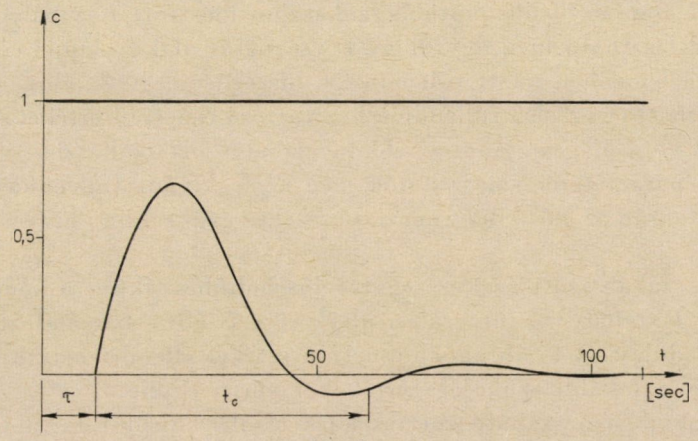
Hasonló vizsgálatokat végeztünk egytárolós holtidős tag esetén is, a független változók $K = 0{,}8$; $T_I/\tau = 1{,}25$ és $\tau/T = 1$ munkapontja környezetében. A számítások eredményeként adódó másodfokú polinom minimumát

$$K_{\text{opt}} = 0.765 + 0.04\,\tau/T$$

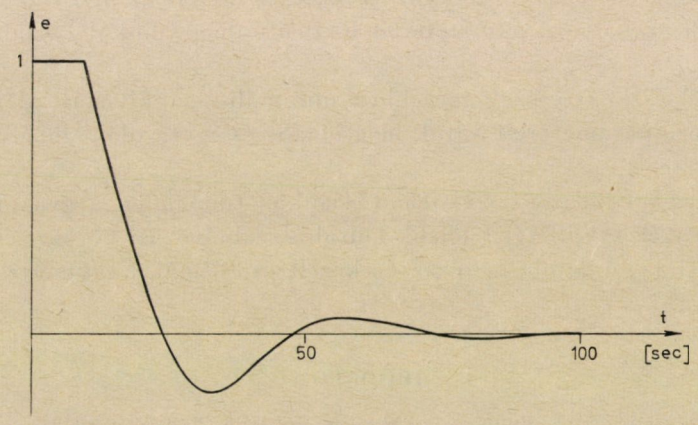
és (3.4)

$$T_{I\,\text{opt}} = \tau[1.184 - 0.0648\,\tau/T]$$

biztosította (a parciális deriváltakat 0-val egyenlővé téve). Itt T a szakasz tárolójának időállandója $\tau = 10$ sec és $T = 10$ sec esetén a (3.4) szerinti beállításnál a szabályozott jellemző átmeneti függvénye a 18. ábrán, a hibajelé pedig a 19. ábrán látható. Ezeket a görbéket digitális szimulációval határoztuk meg.



18. ábra



19. ábra

Következtetések

Úgy érezzük, hogy a bemutatott módszerek sok segítséget jelentenek a holtidős szabályozási rendszerek tervezésében, továbbá betekintést engednek ezen rendszerek tranziens folyamatainak alakulásába is. A kidolgozott diagramok hasznos segédeszközként alkalmazhatók a gyakorlati tervezési feladatokban. Jelen vizsgálatok alapján sokkal közvetlenebb összefüggések dolgozhatók ki a minőségi jellemzőknek a rendszer paramétereitől való függésére. Ezek az itt közölt eredmények további vizsgálatok alapjául szolgálhatnak, itt elsősorban a holtidős rendszerek digitális számítógéppel történő időtartományheli vizsgálatára gondolunk.

A 2. ábra alapján ideális holtidős szakaszhoz illesztett *I* szabályozó integrálási ideje választható meg úgy, hogy egységugrás alakú alapjel esetén a szabályozott jellemzőben adott túllendülést biztosítson. A 3. ábra segítségével meghatározhatjuk az első túllendüléshez tartozó csúcsidő értékét is.

Az 5. ábra diagramjából az előbbi szabályozott szakaszhoz illesztett *PI* szabályozó paraméterei választhatók meg a megkívánt túllendülés biztosításához. A 6. ábrán az előző diagram tervezéséhez gyakrabban használt formáját is közöljük.

Ha a szabályozott szakasz egytárolós holtidős, akkor a kompenzálásra felhasznált *I* szabályozó integrálási idejével a 7. ábra szerint-biztosíthatunk adott túllendülést. A 8. ábrából a csúcsidő értékét ellenőrizhetjük. A 9. ábra a tervezéskor leginkább szükséges értékeket sűríti egybe.

Amennyiben a szabályozott szakasz ideális holtidőt tartalmaz csak, a négyzetes integrálkritérium szerint optimális *I* és *PI* szabályozó paramétereit a (2.4) és (2.7) összefüggésekkel adjuk meg.

Kéttárolós holtidős szabályozott szakasz esetén az *ISE* szempontjából optimális *PI* szabályozó paramétereit biztosító diagramokat közlünk a 13. és 14. ábrán.

A (3.3) és (3.4) összefüggésekben minimális szabályozási időt biztosító *PI* szabályozó paramétereit adjuk meg ideális és egytárolós szabályozott szakaszok esetére.

Ezek az eredmények elvi jelentőségükön túlmenően a gyakorlati rendszertervezés széles területét felölelik holtidős szabályozási körökre és reméljük segítségükkel az eddig oly nehézkesen kezelt problémák nagymértékben csökkenni fognak.

IRODALOM

1. Csáki, F.: Szabályozások dinamikája. Akadémiai Kiadó, Budapest 1970.
2. Csáki, F.—Keviczky, L.—Kovács, T.: Synthesis of Linear Control Systems by Digital Computers. *Acta Techn. Hung.* (1971) (to bo published).
3. Oppelt, W.: Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge. Verlag Chemie, Weinheim 1964.
4. Harriott, P.: Process Control. McGraw-Hill Book Co., N. Y.—S. Fr. 1964.
5. Keviczky, L.—Bányász, Cs.: Tervezett kísérletek alkalmazása irányítástechnikai feladatok megoldására. *VI. Magyar Automatizálási Konferencia*, Budapest 1970.
6. Keviczky, L.—Bak, M.: Diagramok holtidős szabályozási körök túllendülésére. *VI. Magyar Automatizálási Konferencia*, Budapest 1970.
7. Блох, З. Ш.: Переходные процессы в линейных системах автоматического регулирования. Физматгиз, Москва 1961.
8. Серебянский, А. Я.: Метод определения величины максимального отклонения в системах автоматического регулирования, включающих объект о запаздыванием. Приборы и системы управления, 1968 11.
9. Pongparit, V.—Park. S. B.: Rational Delay Functions Based on Continued-Fraction Expansion of e*. *Electronics Letters.* **6** (1970), 20.

Design Control Systems with Dead Time in the Time Domain. In our investigations we adjusted I and PI controllers for controlling plants with ideal dead time (transportation delay) and one or two time lags. A method for calculating overshoot values is presented

The results obtained with the aid of a digital computer are plotted in the form of diagrams. Also the optimization based on the quadratic integral criterion for circuits with dead-time is considered and the results are presented again in the form of diagrams. Approximations relating to the control time and the system parameters are established. The obtained results may be usefully applied in the design of linear single-loop control systems with dead time.

Projektierung von Regelkreisen mit Totzeit im Zeitbereich. In den Untersuchungen wurden I- und PI-Regler an ideale Regelstrecken mit Totzeit und ein und zwei Speichern angepaßt. Eine Methode für die Berechnung der Überschwingweite wird beschrieben. Die mit einem Digitalrechner erhaltenen Ergebnisse werden in Diagrammform mitgeteilt. Die Verfasser beschäftigen sich auch mit der Optimierung der Regelkreise mit Totzeit auf Grund des quadratischen Integralkriteriums und veröffentlichen die Ergebnisse ebenfalls als Diagramme. Für die Abhängigkeit der Regelzeit von den Systemparametern werden annähernde Zusammenhänge berechnet. Die Ergebnisse können für die Projektierung von linearen, einschleifigen Regelkreisen mit Totzeit nutzbringend verwendet werden.

MINTÁK OPTIMÁLIS ELHELYEZÉSI STRATÉGIÁJA, HA A MINTAÉRTÉK EGY SÍKTARTOMÁNYON FOLYTONOSAN VÁLTOZÓ FÜGGVÉNY

JANOSITZ JÁNOS*

[Beérkezett 1969. december 10-én]

Az ásványi előfordulások egy vizsgált területen belül igen változékonyak lehetnek. A kutató fúrásokkal ezen változékonyságot igyekszünk maximális módon felderíteni. Ez olyan telepítéssel lehetséges, amelynél a fúrásokat úgy helyezzük el, hogy onnan kapjunk mindig újabb információt, ahol legnagyobb a bizonytalanság. A dolgozat olyan módszert ismertet, melynél a rendelkezésre álló adatok alapján mindig meghatározható az a fúrási pont, ahol egy újabb fúrás a leggyorsabban csökkenti az előfordulás egy vizsgált adatának bizonytalanságát.

A kettős integrálok Monte-Carlo módszerrel való közelítésénél és a föld mélyében levő ásványkincsek mélyfúrásokkal való kutatásánál és minden olyan feladatnál ahol egy síktartományban kell meghatározni a tartományon belül folytonosan változó függvényértékek átlagértékét, a tartomány különböző pontjaiban vett minták alapján felvetődik az a következő probléma, hogy a síktartományban vizsgált érték átlagáról melyik mintavételi stratégia szolgáltatja a legtöbb információt kötött mintaszám esetén.

Ha a síktartományról semmiféle előzetes információ nem áll rendelkezésre, úgy előzetes mintavétellel megtudhatjuk azt, hogy a tartomány mely részében nagyobb és mely részében kisebb a vizsgált érték változása, illetőleg szórása.

Az előzetes mintavételnél az egyes mintákat szabályos hálópontokba célszerű elhelyezni [1, 5].

Ha a síktartomány területe A és az egyes minták egymástól mért távolsága a, valamint az előzetesen tervezett mintaszám n, úgy szabályos háromszögháló esetén az

$$A = n \cdot \frac{a^2 \cdot \sqrt{3}}{4}, \tag{1}$$

négyzetháló esetén pedig az

$$A = n \cdot a^2 \tag{2}$$

összefüggés alapján határozható meg az a értéke.

* Dr. Janositz János, Nehézipari Műszaki Egyetem, Miskolc-Egyetemváros.

Az [5] alapján az előzetes mintavétel után az újabb mintákat olyan romboid-hálópontokba célszerű elhelyezni, amelyeknél a romboid oldalak iránya és nagysága a maximális, illetőleg minimális szórásirányától és azok nagyságaitól függ. Az egyes irányokba eső szórások pedig úgy vannak értelmezve, hogy az adott irányokba mutató párhuzamos egyenesekkel sávokra osztjuk a vizsgált tartományt és a sávokon belüli szórások átlaga adja meg az adott irányú szórás értékét.

A módszer ellen viszont felhozható az, hogy a szórás értéke általában az egyes irányok mentén a területen belül is változik. Ilyen esetet vizsgálva célunk egy kötött számú mintával azok optimális elhelyezésével a vizsgált síktartományról a legtöbb információt összegyűjteni.

A vizsgálatainknál az egyes mintaelemek költségeitől eltekintünk. Ha a területről semmiféle információnk nincs, úgy a mintákat a következő módon helyezzük el a területen.

Előzetes információszerzés érdekében n mintát tervezünk.

Az n értéke általában a tervezett N végleges mintaszám $10 \div 20\%$-a legyen, de nem kevesebb mint $4 \div 5$. Az n rögzítése után ezeket a mintákat olyan szabályos háromszögháló pontjaiba helyezzük el, hogy az egyes háromszögek területe közelítőleg a terület n-ed részével egyezzék (1).

A szabályos háromszögháló a vizsgált területre való elhelyezésekor lehetőség szerint minél több minta kerüljön a vizsgált síktartomány határvonalainak közelébe. Vagyis az előzetes mintavétel után a tartományban egy tetszőleges helyen a vizsgált jellemző becslésekor a lehetőség szerint maximális esetben legyen módunk interpolációra és minimális esetben legyen szükséges extrapoláció.

A megmaradó N-n számú mintaelem helyének megállapításakor pedig a következőképpen járunk el.

Természetes, hogy egy újabb információ mindig onnan a legsürgetőbb, ahol a legnagyobb a bizonytalanság. Vagyis az újabb mintaelemet olyan területrészen belül helyezzük el, ahol a területrészen belül a mintaértékek átlagának szórása a legnagyobb. A legkisebb területrész, ami itt még figyelembe vehető, az n előzetes minták alkotta háló egy-egy háromszöge.

Legyen a háromszög csúcsaiban levő minták értéke

$$x_1 \leq x_2 \leq x_3. \tag{3}$$

Ha

$$\frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1} = \lambda, \tag{4}$$

akkor a területen belül a szórásnégyzet közelítő értéke:

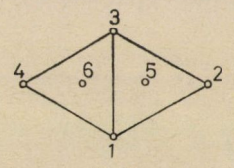
$$\sigma^2 = \frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 - \frac{1}{3}(x_1 + x_2 + x_3)^2}{2} = \frac{(x_3 - x_1)^2}{3}\left[\left(\lambda - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}\right] \tag{5}$$

Az (5) összefüggésből látható, hogy a szórásnégyzet értékét három mintaérték esetében elsődlegesen a legnagyobb és legkisebb mintaérték különbsége határozza meg. A közbenső harmadik mintaérték a szórás értékét pedig csak $0 \div 25\%$-ig befolyásolja. Ebből következik, hogy a maximális szórású helyeket ott kell keresni, ahol két szomszédos mintaérték között legnagyobb az eltérés.

A fentiek alapján a maximális szórású helyek megkeresése meggyorsítható. Ha ui. a maximális szórású háromszög már adott, úgy az újabb mintaelemet ennek a súlypontjában helyezzük el. Legyen az így nyert mintaérték x_4, és a (3)-ban szereplő értékek nélkül a mintaértékek átlaga $\bar{x}_1$, úgy az x_4 figyelembevételével számítható „pontosabb átlagérték" $\bar{x}'$:

$$\bar{x}' = \frac{(n-3)\bar{x}_1 + \frac{3}{4}\sum_{i=1}^{4} x_i}{n}. \tag{6}$$

Természetes, hogy további mintákat mindig azon háromszög súlypontjába helyezünk, melyekben a szórás értéke éppen maximális. Ha így két egymás mellett levő háromszög súlypontjában is már új minta került (1. ábra), úgy az új nagyobb valószínűségű átlagérték $\bar{x}''$:



1. ábra

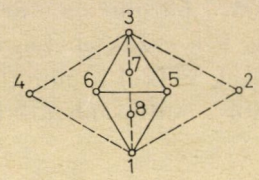
$$\bar{x}'' = \frac{(n-4)\bar{x}_2 + 4\frac{4}{6}\sum_{i=1}^{6} x_i}{n}, \tag{7}$$

ahol $\bar{x}_2$ a két háromszög területén kívül eső minták alapján számítható átlag.

Ha több egymás mellett levő háromszögben is adott újabb mintaérték, úgy az átlagszámításnál ezt az (5, 6)-hoz hasonló módon kell figyelembe venni.

A megmaradó minták fokozatos elhelyezésével előfordulhat, hogy a képződött kisebb — a kiinduláskori háromszögek területének harmadrészével egyező területű egyenlő oldalú — háromszögek valamelyikében a számítható szórás egyharmada nagyobb lesz, a megmaradt nagy háromszögekben számítható legnagyobb szórásnál. Ilyenkor a legközelebbi mintát az adott kis háromszög súlypontjában helyezzük el. Az átlag korrigálása ebben az esetben megbízhatóbb átlagértékhez vezet.

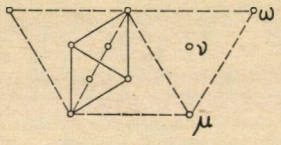
Az átlag korrekciója a következőképpen történik. Az egymás mellett levő kis háromszögekben, melyek súlypontjába már új minta is került, a háromszög csúcspontjaiban és súlypontjaiban levő minták alapján nyert értékekből számítunk egy átlagot, és ezt olyan súllyal vesszük figyelembe, ahány nagy háromszögbeli csúcspontot tartalmaz. A 2. ábra alapján, ha az 1. ábra és (7) összefüggés jelöléseit megtartjuk:



2. ábra

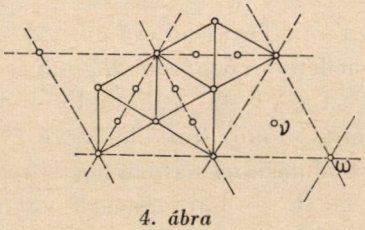
$$x = \frac{(n-4)\,\bar{x}_2 + x_2 + x_4 + 2 \cdot \frac{2}{6}(x_1 + x_8 + x_5 + x_6 + x_7 + x_3)}{n}. \qquad (8)$$

Ha esetleg így valamely nagy háromszög súlypontból nyert mintaérték mellől a csúcsponti mintaérték közül egy, kettő vagy mindhárom már más számításokban szerepelne, úgy azt a megmaradó kettőhöz, ill. egyhez vagy a legutóbbi esetben ahhoz rendeljük, melynek környezetében legkevesebb adat áll rendelkezésre (3., 4., 5. ábra).



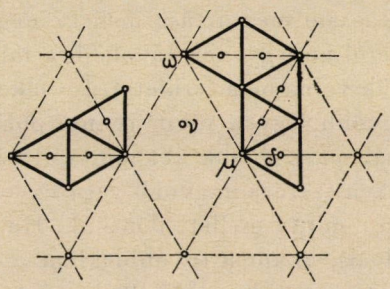
3. ábra

$$x^{(1)} = \frac{(n-2)\,\bar{x}_3 + 2 \cdot \frac{2}{3}(x_\nu + x_\omega + x_\mu)}{n},$$



4. ábra

$$\bar{x}^{(k)} = \frac{(n-1)\,\bar{x}_4 + \frac{1}{2}(x_\nu + x_\omega)}{n}.$$



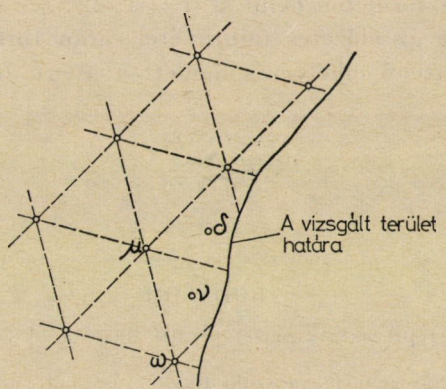
5. ábra

A bevonalkázott háromszögekben az átlag számításánál az x'_ω-t vesszük figyelembe:

$$x'_\omega = \frac{x_\omega + x_\nu}{2}.$$

Ha x_δ adat nem állna rendelkezésre, úgy x_μ helyett is x'_μ-t kellene figyelembe venni a számításoknál:

$$x'_\mu = \frac{x_\nu + x_\mu}{2}.$$



6. ábra

Ha a kis háromszögek szórásának harmadrésze nem nagyobb lényegesen a nagy háromszögbeli szórásnál, akkor a kisebb szórás ellenére is a nagy háromszög súlypontjában célszerű egy újabb mintát elhelyezni. Itt ugyanis a minták távolabb vannak egymástól és így a számított szórás bizonytalansága is nagyobb.

Hasonlóképpen kell kezelni a terület peremrészeit. Amint már említettük az extrapoláció általában nagyobb bizonytalansággal jár mint az interpoláció. Ennek a bizonytalanságnak a csökkentése érdekében az előzőekben a háló elhelyezéskor említetteken felül célszerű az (1)-ben számított háromszög olda-

lakat az előzetes mintaszám megtartása mellett megnövelni, hogy az előzetes minták a terület szélétől ne legyenek távolabbra mintha N számú mintákból készített hálóval fedtük volna be a területet. Így elkerülhető az, hogy az extrapolációs távolság nagyobb legyen mint az interpolációs. A széleken elhelyezendő újabb mintáknál sokszor csak két minta alapján dönthetünk (6. ábra).

Ha x_ω és x_μ értékek szórása nagyobb vagy egyező egy nagy háromszögön belüli szórással, úgy a ν minta mellett döntünk. Ha ugyanez áll x_μ és x_ν értékekre (egységnyi súllyal), akkor a továbbiakban a δ minta mellett döntünk.

Az N számú minta ily módon való elhelyezése után az ismertetett módon számítható a legvalószínűbb átlagérték. Ennek szórása a következőképpen számítható.

Legyen az összefüggően egyező „sűrűségű" minták száma $n_2, n_2, \ldots, n_\nu$ ezen i ($i = 1, 2, \ldots, \nu$) részterületen belül a szórásnégyzet σ_i^2:

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} [x_j - \bar{x}_i]^2}{n_i - 1} \qquad [i - 1, 2, \ldots, \nu]. \tag{9}$$

ahol $\bar{x}_i$ a részterületen belül az egyező sűrűségű mintákból számítható átlag. Legyen az egyes részterületen belül k_i ($i = 1, 2, \ldots, \nu$) számú olyan minta, melynek elhelyezése az előzetes mintavétel során történt. Így az N számú minta ily módon történő elhelyezés mellett a nyert átlag érték szórásnégyzete $\sigma_{\bar{x}}^2$:

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \sum_{i=1}^{\nu} \frac{k_i^2}{n^2} \sigma_i^2. \tag{10}$$

IRODALOM

1. JANOSITZ, J.: Ocena reprezentatywnosci próbek Przegla, d Geologiczny Nr. 8. serpien. 1969. Varsó.
2. PRÉKOPA A.: Valószínűségelmélet műszaki alkalmazásokkal. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1962.
3. RÉNYI A.: Valószínűségszámítás. Tankönyvkiadó, Budapest 1954, 1966.
4. STAMMBERGER F.: Einfürhrung in die Berechnung von Lagerstättenvorräten fester mineralischer Rochstoffe. Akademie-Verlag, Berlin 1956.
5. TREMBECKI. A. S.: Zasady projektowania selektiwnej explolatacji zlóz surowców mineralnych, Wydawnictwo „Slask" Katowice 1966.

Strategy of Optimum Placing of Samples, if the Sampled Value is a Function Continuously Varying in a Plane Area. Within an investigated territory, occurrence of minerals may vary widely. By carrying out trial drillings, as thorough an exploration as possible is aimed at. This is possible by placing the drillings in such a way that fresh information is obtained from where the uncertainty is the greatest. The paper presents a method for determining, from the available data, always that drilling point where a new drilling will maximally reduce the uncertainty about the occurence of an examined characteristic data.

Optimale Strategie für die Verteilung der Proben, wenn der untersuchte Wert eine in einem ebenen Bereich kontinuierlich veränderliche Funktion ist. Innerhalb eines untersuchten Bereichs können die Mineralvorkommen stark veränderlich sein. Durch Probebohrungen wird angestrebt, diese Veränderlichkeit maximal aufzudecken. Dies ist mit einer solchen Plazierung möglich, bei der die Bohrungen so angeordnet werden daß immer dort neue Informationen erhalten werden wo die Unsicherheit am größten ist. Die Arbeit beschreibt eine derartige Methode, mit welcher auf Grund der verfügbaren Daten immer derjenige Bohrpunkt bestimmt werden kann, wo eine neue Bohrung die Unsicherheit einer untersuchten Charakteristik des Vorkommens am schnellsten verringert.

NAGY ÁRAMSŰRŰSÉGŰ KÉSZLETKATÓDOK

BUDINCSEVICS ANDOR*
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

[Beérkezett 1970. október 2-án]

A szerző az „L" katódok működési elméletét, jellegzetes tulajdonságait és alkalmazási területét ismerteti. Kritikai tárgyalását adja a LEMMENS és munkatársai által ismertetett technológiának, valamint tárgyalja hengeres és sík „L" katódok konstrukcióját, ennek hatását az emissziós paraméterekre. Továbbá beszámol egy új konstrukciós megoldásról az „M" katódok esetén, melyeknél a porózus wolframot többrétegű wolfram huzal tekercselés helyettesíti. Tárgyalja a „L" katódok előállítását, préselt és szinterelt porozus testek néhány problémáját, valamint az így készült diodák emissziós tulajdonságait.

1. Bevezetés

Az a széles körű kutatómunka, mely a katódkutatás terén megnyilvánul, azzal indokolható, hogy az elektroncsövek teljesítménye, élettartama, megbízhatósága a katódok minőségétől függ. A felsorolt feltételek biztosítása közben a katód van a legnagyobb elhasználódásnak kitéve.

Jelen tanulmány olyan nagy áramsűrűségű katódok tulajdonságaival foglalkozik, melyeknél egy magas olvadáspontú fémfelületen, mint pl. a wolframon földkáli fémek atomos rétege van adszorbeálva. Az ilyen rendszereknél, a kilépési munka 4,5 eV-ról 1,6÷2,0 eV-ra csökken és nagy áramsűrűségű katódok nyerhetők.

A különböző katód rendszereket három fő csoportba szokás besorolni:

1. magas olvadáspontú tisztafém katódok, wolfram és tantálkatódok (2000 °C felett emittálnak);

2. wolframfém felületen adszorbeált atomos elektropozitív elemek, „Filmkatódok" thoriumos wolfram valamint „L" és „M" katódok, ezek 900 és 1600 °C közötti hőmérsékleten emittálnak;

3. magfémen levő földalkálioxidok „oxidkatódok" (560 °C — 850 °C-on emittálnak.)

Azokat a katódokat, melyeknél wolframfém felületen a kilépési munkát egy elektropozitív elem adszorbeált atomos rétege csökkenti le, első ízben LANGMUIR és DUSHMAN [1] írták le.

* Dr Budincsevics Andor, Budapest, XIII. Toborzó u. 1.

Később a felületi atomos rétegű katódok működését De Boer és Wagener [2] felülvizsgálták és új megállapításokra jutottak. Ha tiszta wolframfém felületén adszorbeált elektropozitív elem atomjai között egy elektronegatív gáz atomjai, mint pl. az oxigén is elhelyezkedik, akkor ezen közbeeső réteg csökkentő hatással lesz a kilépési munkára, sőt a réteg párolgását és az emisszió stabilitását is kedvezően befolyásolja.

Oxigénmentes tiszta wolfram felületére párologtatott bárium adszorbcióját Moore és Allison [3] vizsgálták és hasonló megállapításokra jutottak. Ezek a monoatomos báriumrétegek gyorsan lepusztultak és nem voltak alkalmasak gyakorlatilag használható katódok készítésére.

Lemmensnek [4] és munkatársainak sikerült wolfram felületen adszorbeált báriummal katódot előállítani egy új szerkezeti megoldással. Az elpárolgó fémbáriumot állandóan utánpótolták egy készlettérből a porózussá tett wolfram pórusain keresztül. Ma ezeket a katódokat „L" (Lemmens) illetve készletkatódoknak nevezik.

A készletkatódok emissziós tulajdonságai igen kedvezőnek bizonyultak: pl. nagy áramsűrűségek vehetők ki, úgy folytonos mint impulzus üzemben; nagyfeszültségű üzemben szikrázásmentesen üzemeltethetők: ionbombázásra nem érzékenyek; gázfelszabadulás, valamint mérgezések után gyorsan regenerálódnak.

A készletkatódok elsősorban nagy fajlagos áramsűrűségű mikrohullámú csöveknél bírnak jelentőséggel. Itt a geometriai méreteket a hullámhossz korlátozza és legtöbbször pontszerű nagy fajlagos emissziójú katódokra van szükség. Ezek elérik folytonos üzemben $2 \div 4$ A/cm^2 értéket, vagy impulzus üzemben a 100 A/cm^2 áramsűrűséget. Ezért elsősorban impulzus magnetronokban, klisztronokban, síktriodákban és egyes típusú haladóhullámú csövekben kerülnek alkalmazásra.

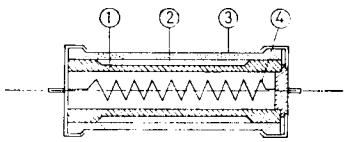
Az oxidkatódok bár szintén nagy fajlagos emisszióval bírnak, a fenti azonos üzemi terheléseknél hátrányosan viselkednek az oxidréteg félvezető jellegénél fogva.

A Lemmens által leírt készletkatódok szerkezeti és működési feltételeinek biztosítása közismerten számos nehézségbe ütközik. Ezek egyrészt a katód szerkezetéből adódó bonyolult technológiából, másrészt az emissziós áram csökkenéséből származnak. Ezeknek a bajoknak a maradék gázok okozta nagymértékű mérgeződés és a velejáró aránytalanul magas báriumpárolgás az okai.

A felsorolt problémák megoldására feladatul tűztük ki, olyan technológia kidolgozását, mely kielégíti a katód működési mechanizmusának feltételeit és biztosítja nagyszámú készletkatód gyártását, nagy áramsűrűség és élettartam mellett.

2. Készletkatódok működési mechanizmusa

A készletkatódok működésének fizikai és kémiai folyamatait számos szerző vizsgálta és errevonatkozóan egy teljes elméletet dolgozott ki Du Pre és Rittner [5], mely a következő képet adja a készletkatódokra vonatkozóan: Az 1. ábrán egy készletkatód szerkezeti felépítésének vázlatos képe látható. Ez



1. ábra. Készletkatód szerkezeti felépítésének vázlatos képe

áll egy üreges molibdén hengerből (1), melybe báriumkarbonátot helyeznek (2) és egy porózus wolframhengerrel zárnak le (3). A katód fűtését egy alumíniumoxiddal szigetelt wolframspirál (4) biztosítja.

A katód üregében elhelyezett karbonátot magasvákuumban termikusan elbontják báriumoxidra, mely érintkezik a meleg wolframfallal és redukálódik a következő egyenlet szerint:

$$6\,BaO + W = Ba_3WO_6 + 3\,Ba.$$

Ez a kémiai redukció magas hőmérsékleten áramkivétel nélkül is képes fémbáriumot termelni. A készlettérben ily módon kialakult báriumgőz nyomása, a wolfram pórusain keresztül egyenlítődik ki. A pórusokon keresztül diffundált bárium a wolfram felületén szétterjed és a kilépési munkát lecsökkenti, majd elpárolog a felületről.

A felület báriummal történő befedettsége a redukció folytán állandóan utánpótlódik a pórusokon keresztül. Wolframfelületen az atomos bárium élettartama az adszorbciós és deszorbciós energiáktól függ, melyet a katód hőmérséklete és a szennyező idegen anyagok pl. maradék gázok nagymértékben befolyásolnak.

Ha wolframfelületre oxigénatomok is adszorbeálódnak, ezek közbeeső atomokként orientáló hatással vannak az adszorbeálódó bárium atomokra, ezekkel dipólusokat képeznek és felületi potenciál gradienseket okoznak. Oxigén hatására a kilépési munka tovább csökken, az emisszió stabilabbá válik és a katód párolgás is mérséklődik.

A készletkatódok magas emissziós áramát a tiszta wolframfelületen adszorbeált atomos báriumnak és oxigénnek tulajdonítják. Erre vonatkozóan Brodie és Jenkins [6] széles körű kutatómunkát folytattak.

Az emisszió változására vonatkozóan minden esetben, mint megállapítható volt, az anód és egyéb alkatrészek gázleadásától és elpárolgó szennyeződésektől származnak, amit általánosan katódmérgezésnek neveznek.

A wolframfelületen adszorbeált atomos réteg rendkívül érzékeny a gázszennyeződésekre. A mérgezésekre vonatkozóan JENKINS és TRODDEN [7] méréseket végeztek és meghatározták a mérgező gázok kritikus nyomását az emisszióra:

O_2-re 10^{-8} torr.-nál romlik le az emisszió
H_2O-ra 10^{-7} torr.-nál romlik le az emisszió
CO_2-re 10^{-6} torr.-nál romlik le az emisszió
levegő-re 10^{-5} torr.-nál romlik le az emisszió

A szénmonoxid, nitrogén és hidrogén hasonló nyomásértékek mellett kevésbé bizonyultak mérgezőnek.

Ha a mérgező gázok nyomása a fenti érték alá csökken, akkor a katód feléledési ideje 5—12 sec.

Árammal történő aktiválás kizárólag termikus folyamatot indít el és az anódból gázt szabadít fel, megbontva a katód kémiai egyensúlyát. Ennek igazolására azt találtuk, hogy hosszú impulzusoknál pl. 100 μsec-nál az áram letörések és tranziensek az anód anyagától és a hőmérséklettől függenek. Kísérleti diodáknál titán anód alkalmazása esetén az áram letörések csökkentek és a tranziensek kisebbek lettek.

3. Készletkatódok technológiája

Készletkatódok készítésére vonatkozóan több szerző leírása ad útmutatást. Ezeket az eljárásokat kritikai elemzésnek vetettük alá. Megállapítható volt, hogy a katódok geometriai alakja befolyással van a katódgyártás technológiájára. A hengeres készletkatódokra más technológiát célszerű alkalmazni, mint síkkatódok esetében.

A hengeres készletkatódokat 28%-ra szinterelt porózus wolframrúdból mechanikai megmunkálással állítottuk elő. A síkkatódok részére egy porkohászati és szinterelési eljárást dolgoztunk ki.

A hengeres katódok megmunkálását a pórusoknak idegen fémekkel való telítése nélkül végeztük el, a wolfram szennyeződésének elkerülése végett.

A működés mechanizmusa szerint a készlettérben bárium gőznyomásnak kell kialakulni, mely kizárólag a pórusokon keresztül egyenlítődhet ki a vákuumtérrel. A készlettérnek és a vákuumtérnek tökéletes zárását kell biztosítani, oly módon, hogy a szerkezeti részeken ne hatoljon át a bárium.

Magas olvadáspontú fémeknél, mint pl. a wolfram és molibdén a hegesztéses technológia olyan feladatot jelent, melynél a porózus wolfram felületi szuper-tisztasága nem biztosítható.

Vákuumtechnikai szempontból vizsgálva a kérdést, vajon milyen nyomáskülönbségek lépnek fel a vákuumtér és a készlettér között, másrészt a szerkezeti részeknél milyen mértékű tömítetlenség engedhető meg?

A báriumgőz tenziójára vonatkozóan CLASSEN és VENEMANN [8] végeztek méréseket, melyek szerint 1400 °K-nél:

W-on-BaO tenziója Ba-ra 8×10^{-5} torr
Mo-en BaO tenziója Ba-ra 1×10^{-6} torr

A katód vákuumtere általában jobb mint 1×10^{-7} torr. Kísérletileg kimutatható, hogy a fenti alacsony nyomások esetén a kiegyenlítődés a hosszú zárófelületen keresztül már szoros illesztés esetén sem megy végbe, a szabad úthossz nagy értéke miatt. Ezért a kémiai redukcióból származó alacsony bárium-gőznyomás csak a pórusokon keresztül, diffúzió útján tud kiegyenlítődni.

RITTNER, AHLER és RUDLEDGE [9] meghatározták a bárium mozgékonyságát wolframfelületen. A migráció úthossza eléri a 0,1 mm/sec-ot, amikor a felületi érdesség nem több mint 3 μm.

A számértékek lehetőséget adnak, olyan készletkatód technológia tervezésére, mellyel az elméleti feltételek biztosíthatók és egyszerű tömeggyártás is megvalósítható.

Figyelembe véve a bárium nagy migrációs úthosszát, ennek megfelelően pl. a porózus fal vastagságát 0,5 mm-nek, az illesztéses felületek hosszát 5 mm-nek választottuk. Ebben az esetben a bárium fennakad a szoros illesztéses záró felületen és nem tud átjutni a vákuumtérbe csak a porózus falon keresztül.

Fennmarad a kérdés, hogy a felfűtött katód nem lazul-e meg meleg állapotában és báriumgőzre áteresztővé válik-e.

(Mo. hőtágulási együtthatója $5{,}3 \times 10^{-6}$ fok^{-1}
W. hőtágulási együtthatója $4{,}4 \times 10^{-6}$ fok^{-1})

A katód szerkezete folytán a nagyobb hőtágulású molibdénhüvely helyezkedik el a porózus wolframtestben és így a melegedés következtében fellépő nagyobb hőtágulás miatt a zárás szorosabbá válik. A rugalmas porózus wolfram pedig meghibásodás nélkül ellenáll a nyomásnak.

A készlettér zárását megoldottnak találtuk, egy sok tekintetben kedvező hideg megmunkálási technológiával. Ennek eredményességét a kísérletek is mindenben igazolták.

A wolfram porozitásának kérdését is részletesen megvizsgáltuk és új módszert dolgoztunk ki a porózus wolframtestek külső és belső felületének valamint porozitásának gyors meghatározására. [10]

A porózus wolframtestek külső és belső összfelületét hidrogén peroxidnak wolframfelületen végbemenő katalitikus bomlásának módszerével mértük. A wolframtest porozitását levegőnek a pórusokon történő átáramlási sebességével határoztuk meg. Ezen két módszer eredményei jó egyezést adtak, a számított és mért értékekkel a porózus felület nagyságára 11—12-szeres értéket kaptunk a tömör wolframkocka felületéhez viszonyítva.

Meghatároztuk a wolframpor fajlagos felületét is, melynek szemcseméretе 0,5 és 3 μm között változott. Eszerint egy 28%-ig színterelt wolfram kocka 1 cm^3 fajlagos pórus felülete 1,100 ÷ 1,200 cm^2/cm^3 között volt. Egy kísérleti katód külső és belső teljes hasznos felülete 490 cm^2-nek adódott.

A mérések igazolták, hogy a nagy pórusok úgy a külső, mint a belső felület csökkenését jelentik, a finom pórusok viszont a felületek növekedését eredményezik. A gyakorlati értékek azonban csak szűk határok között mozogtak, mivel a porózusfelület nagysága függ a bárium párolgás és utánpótlás egyensúlyától, ugyanakkor a felület érdessége nem haladhatja meg a 3 mikront.

A tapasztalatok szerint a megmunkált porózus wolframtestek legfőbb problémája a műveletek során elzáródott pórusok megfelelő módszerrel való felnyitása volt, a végleges összeszerelés előtt. Ezért az elkészült wolframtesteket, kémiai tisztításnak és maratásnak vetettük alá, egyrészt azért, hogy az elzáródott pórusokat felnyissuk, másrészt, hogy a wolframfelület szupertiszta állapotát biztosítani tudjuk az atomos bárium adszorpciója számára.

A kémiai eljárás a következő: 24 órát 30%-os HF-ban, majd 24 órát 10%-os HCL-ben marattuk, utána 48 órát kétszer desztillált vízben áztattuk, mely utóbbit sokszor cseréltük, míg a mosóvíz ellenállása az 500 ezer Ohm/cm-t el nem érte. Ezután acetonban víztelenítettük, majd száradás után 900 °C-on tisztított száraz hidrogén áramban izzítottuk.

A molibdénhengert a szokásos tisztításnak és hidrogénáramban történő izzításnak vetjük alá. A Mo. henger készlettér részét karbonátanyaggal vonjuk be, melynek összetétele 50% $BaCO_3$ + 45% $SrCO_3$ + 5% $CaCO_3$. A beszórást izobutilalkoholos szuzpenzióval kötőanyag nélkül készítettük. A felvitt anyag mennyisége 15÷20 mg/cm^2 volt.

Ezt követi a katód összeszerelése: a porózus wolframhengert 100 °C-ra felmelegítjük, és a hideg molibdénhengert betoljuk a wolframtestbe.

A kész katódszerelvényből kísérleti diódákat készítettünk, és a 2J32 típusnak megfelelő magnetronokba szereltük. A kísérleti diódák anód — katód távolsága 5 mm, az anódok molibdénlemezből készültek, melyek közepén egy 2 mm átmérőjű furat volt a pirometrálás céljára.

A kész csöveket szivattyúra helyeztük és 10^{-6} torr-ra leszívtuk, utána 450 °C-on 4 órát kifűtöttük. Ezután megkezdtük a katód lassú termikus elbontását és a katód hőmérsékletét olyan mértékben emeltük, hogy a vákuum 1×10^{-5} torr-nál rosszabb ne legyen, kb. 15 ÷ 20 perc után a katódhőmérsék-

let eléri a 800 °C-t, amikor is néhány μA ionáram tapasztalható a katód és anód között, ez az aktiválás folyamán lassan csökken és átmegy elektron indulóáramba. Ezután a hőmérsékletet 5 percre felemeljük 1100 °C-ig és figyeljük az indulóáram változását, amely eléri a 0,2 ÷ 0,3 mA/cm² értéket. Ezt követően a katód hőmérsékletét 900 °C-ra csökkentjük és elektronbombázással terheljük az anódot. A terhelés folyamán gázfelszabadulás következtében katód mérgeződés következik be, ekkor sem lehet az emissziós áramcsökkenés nagyobb, mint a telítési áram 10%-a.

A gáztalanított és aktivált diodát a szivattyúról leforrasztottuk és getter elpárologtatásával a vákuumot megjavítottuk. Ezután a diódát 50 órát égettük 200 mA áramterheléssel, majd emissziós méréseket végeztünk, folytonos és impulzus üzemben.

A 2. ábra mutatja a diodaáram és feszültség görbéjét *a)* folytonos és *b)* impulzus üzemben.

4. Sík-katódok technológiája

Készletkatód kutatásunk a sík-katódokra is kiterjedt. Több sík és homorú-Pierce katódot készítettünk, melyek 20 mm ∅-től 2,8 mm ∅-ig változtak.

Az alkalmazott technológia: wolframpor préseléses és zsugorodás nélküli növesztéses színterelésen alapult. A készletkatód többi alkatrésze molibdén lemezből mélyhúzással vagy molibdén rúdból forgácsolással készíthető.

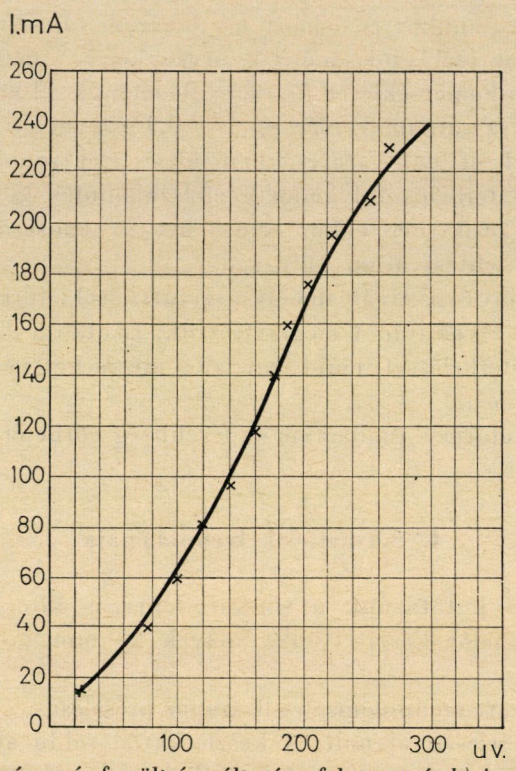
A kémiailag tisztított és H_2-ben izzított molibdén alkatrészt egy kétrészes szerszámba helyezzük és a fent leírt módon maratott és tisztított wolframport bemérjük a szerszámba. Ezután hidraulikus présen 0,6÷0,8 t/cm² nyomással összepréseljük. A nyomást lassan és fokozatosan 20 sec alatt értük el és 20 sec alatt csökkentettük le. Ezzel a módszerrel hibátlan, repedésmentes porózus wolframtestek készíthetők, 0,8 mm vastagságban.

A préselt porózus alkatrészeket, lefedett molibdéncsónakban 1550 °C-on erősen nedvesített hidrogén áramban 5 percig izzítottuk.

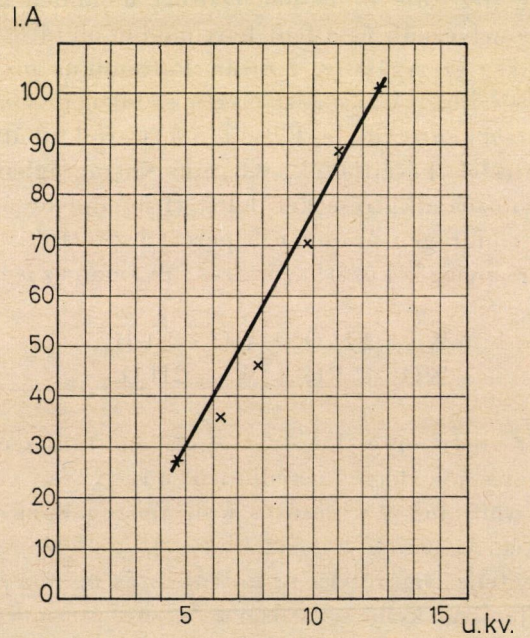
A wolfram és a vízgőz között az izzítás folyamán az ismert folyamat megy végbe:

$$W + 2\,H_2O = WO_2 + 4\,H,$$
$$WO_2 + 4\,H = W + 2H_2O.$$

A folyamat eredménye, hogy az egyes volframszemcsék növekednek, másrészt erős kötés jön létre a molibdén hüvelyhez, melynek hőtágulása nagyobb, mint a wolframé és a porózus wolfram rugalmas szerkezete kiegyenlíti a fellépő erőket. Az izzítás hőmérsékletének és idejének gondos beállításával elérhető, hogy teljes színterelés ne következzék be és a pórusok ne záródjanak össze. Az eljárással kellő szilárdságú és porozitású wolfram katódtestek



2a. ábra. **Diodaáram és feszültség változása folytonos és *b)* impulzus üzemben**



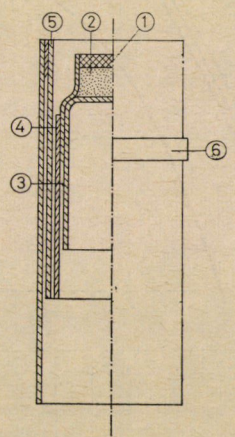
2b. ábra

állíthatók elő és elkerülhető volt a szennyezésekkel járó hegesztéses eljárás.

A síkkatódokat a szinterelés után hasonló tisztítási és maratási eljárásnak vetettük alá, mint a már leírt hengeres wolframtestek esetében. Itt is a kémiai tisztítás és a pórusok kinyitása biztosítja a katódfelület szupertiszta állapotát.

A tisztított katódrészbe a kimért karbonát anyagot beadagoljuk, majd a záróhüvelyt szorosan illesztve szerszám segítségével összenyomjuk. Az illesztéses zárásnak megfelelően hosszú felületeket alkalmazunk.

A 3. ábra egy sík „L" katód szerkezeti felépítésének metszetét mutatja.



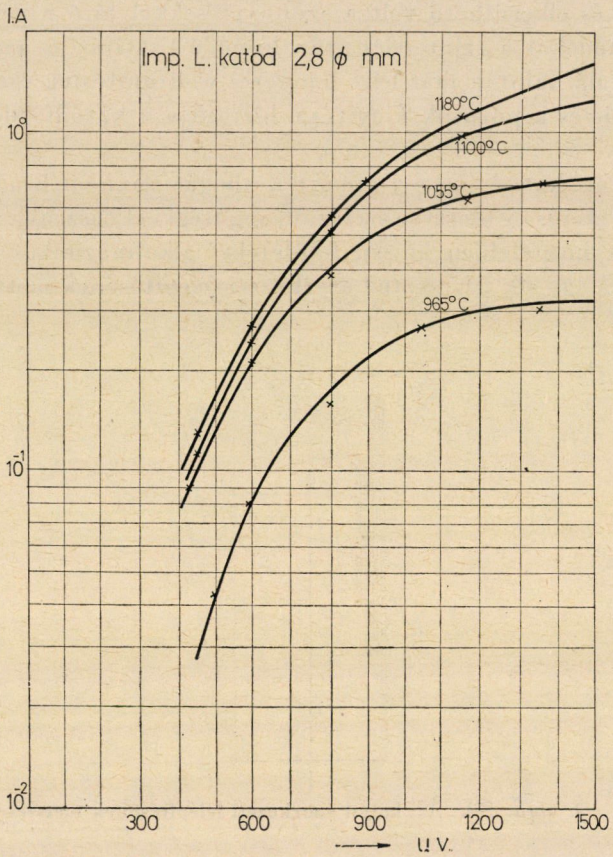
3. ábra. Sik „L" katód szerkezeti felépítésének metszete

A készletkatódok átlagosan 2,5÷3-szoros fűtőteljesítményt igényelnek, mint a hasonló katódfelületű oxidkatódok, ezt a magasabb üzemi hőmérsékletük és nagyobb, valamint feketébb sugárzó felületük magyarázza.

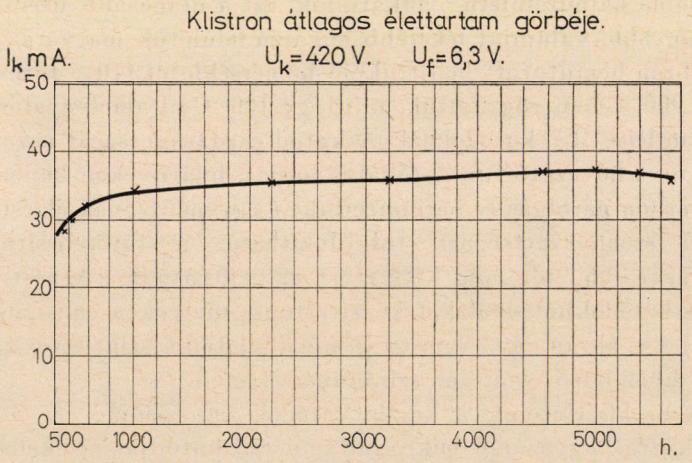
Az ábrán bemutatott konstrukció hőmérsékletét (10^{-7} torr vákuummal számolva) 900 °C-ban rögzítettük, mintegy 100 °C-al alacsonyabban, mint az irodalomban leírt „L" katódoknál. A katód gazdaságosságát azzal javítottuk meg, hogy rossz hővezető Tantál-fóliából hármas hőárnyékoló köpennyel vettük körül. A bárium párolgás és báriumredukció egyensúlyának alacsony értéke a kismértékű szennyezettségnek tulajdonítható; a fűtőteljesítmény igény csökkent, kevesebb volt mint kétszerese az oxidkatódhoz képest.

A sík-katódokból diodákat készítettünk, melyeken emissziós méréseket végeztünk. A 4. ábrán egy 3 mm ∅-jű készletkatód feszültség és áramgörbéjét láthatjuk, különböző wolfram színhőmérsékleten.

További kísérleteink a készletkatódok emissziójára és élettartamára terjedtek ki, és nagyszámú mikrohullámú cső katódját értékeltük ki. Ezek eredményét az 5. ábra tartalmazza.



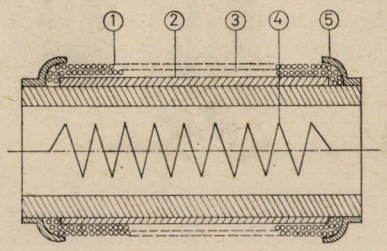
4. ábra. **Sík „L" katód áram és feszültség változása különböző hőmérsékleten.**



5. ábra. **„L" katódok élettartam változása.**

5. Migrációs „M" katódok

Kutatásainkat a készletkatódok továbbfejlesztésére irányítottuk, egy új szerkezeti megoldást javasoltunk, a migrációs „M" katódot [11], melynek szerkezeti megoldását vázlatosan a 6. ábrán láthatjuk.



6. ábra. „M" katód vázlatos szerkezeti képe

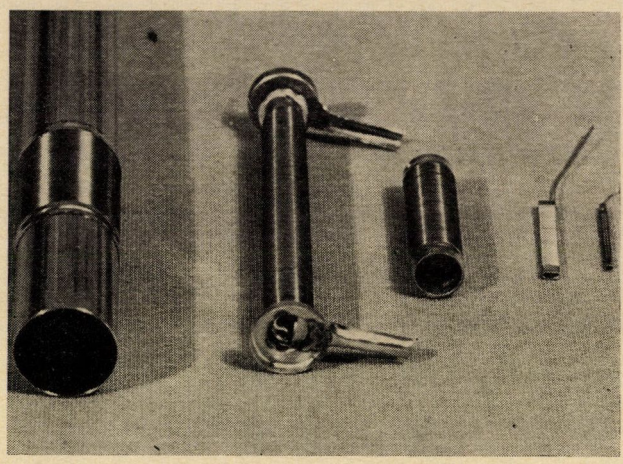
Az „M" katód áll egy katódnikkel magfém hengerből, mely a szokásos redukáló anyagot (0,02% Mg-ot) tartalmazza. A nikkel hengert földalkálikarbonát bevonattal láttuk el. A felvitt hármas karbonát összetétele megegyezett az „L" katódokéval és mennyisége 20÷30 mg/cm². Ezt követően a bevonatot betekercseltük 20÷25 mikron átmérőjű maratott és izzított wolframhuzallal, a meneteket szorosan egymás mellé tekercselve. A végeken a tekercselést tovább folytattuk kb. 2 mm-rel, a bevonaton túl a készlettér lezárása céljából. A tekercselt rétegek száma 2÷4 sor lehet a huzal vastagságától függően.

A szivattyúzást és aktiválást mindenben azonos körülmények között folytattuk, mint az „L" katódoknál A 7. ábrán láthatók „M" katódok képe 14 mm ∅-től egészen 0,8 mm ∅-ig.

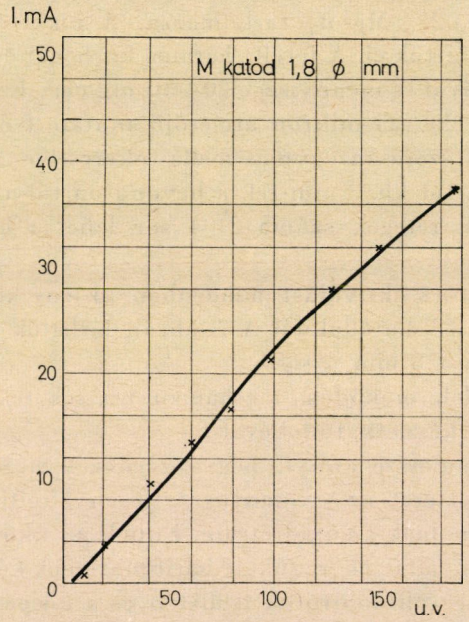
Az „M" katódok működési mechanizmusa sok tekintetben azonos a porózusfalú wolfram készletkatódokéval.

A különbség mindössze annyi, hogy szerkezeti megoldása eltér az „L" katódoktól. A készletteret az oxidanyag teljesen kitölti, mivel a wolframdrótok szorosan rásimulnak az oxidrétegre. Ennek az a következménye, hogy az oxidból a wolfram által ne redukált báriumatomok közvetlenül migráció útján szétterjednek a wolframdrótok felületén és a kilépési munkát leszállítják, mint a porózus wolfram esetében. A bárium utánpótlás az „M" katódoknál is folyamatosan biztosítva van.

A migrációs „M" katódok tulajdonságai megegyeznek az „L" katódokéval, azonban gyártástechnológiájuk lényegesen egyszerűbb. További előnyük, hogy lehetőség adódik 1 mm-nél kisebb átmérőjű hengeres és lapos készletkatódok készítésére. A 8. ábrán „M" katódok áram és feszültség görbéjét láthatjuk folytonos üzemben.



7. ábra. Különböző méretű „M" katódok képe.



8. ábra. „M" katódok áram és feszültség változása folytonos üzemben.

Az „L" és „M" katódok magnetronokban végzett vizsgálatait oszcillációs és impulzus üzemben az I. táblázat tartalmazza.

A készletkatódok élettartamát a bárium párolgása határozza meg. A gyártás folyamán elkerülhetetlen, hogy a szennyezések és a maradékgázok

ne befolyásolják a katódot dinamikus egyensúlyának kialakulásában. Célszerű tehát a párolgást minél alacsonyabb szintre csökkenteni, hogy a dinamikus egyensúly alacsony szinten valósuljon meg, mert az emissziós áram nagysága nem arányos a bárium párolgásával.

I. táblázat

Tip.	Katód	Freq. Mc.	Üzem Imp.	Anód Kv.	Anód I. A.	Teljesítmény KW.	Idő h.
2J32	L.	2900	I. μsec	25	37	310	1400
2J32	M.	2900	I. μsec	25	33,5	270	700

A további kísérleteink során választ kerestünk a bárium egyensúlyát biztosító feltételekre, a Ca.-nak a párolgást és kilépési munkát csökkentő szerepére is. A kérdést behatóan tanulmányozta COPPOLA és HUGHES [12] a szinterkatódokon. A szinterkatódok annyiban különböznek az „L" katódoktól, hogy a készlettér magában a pórusokban helyeződött. A szinterkatód is a készletkatódok új szerkezeti változatának tekinthető.

A katód működési mechanizmusa minden tekintetben azonos. Itt is a wolfram kristály felületeken abszorbeált báriumnak atomos rétegén kialakuló dinamikus egyensúlyt kell biztosítani.

A további kísérletek során magyarázatot kell keresni a monoatomos báriumoxid párolgásának optimális egyensúlyának beállására, továbbá arra, hogy milyen nem tisztázott folyamatok határozták meg, mely paraméterek siettetik vagy késleltetik a tiszta egyensúly kialakulását a katód működési hőmérsékletén.

Dispenser Cathodes with High Current Density. The operation principle of the „L" cathode, its characteristic features and the possibilities of applying it, are discussed by the author, and considerably simplified as compared to the cathode of Lemmens and others. The new version of „L" cathode design in a tube form, so-called „M" cathode, is presented in which, instead of porous sintered tungsten, the multilayer tungsten wire is used. The method of preparing flat „L" cathodes with porous tungsten layer pressed directly in molybdenum tube and sintered is presented. Emission properties of developed cathodes are given.

Vorratskathoden mit hoher Stromdichte. Der Verfasser legt die Theorie der Wirkungsweise, die charakteristischen Eigenschaften und das Anwendungsgebiet der „L"-Kathoden dar. Er wertet die von LEMMENS und seinen Mitarbeitern publizierte Technologie sowie die Konstruktion der zylindrischen und ebenen „L"-Kathoden kritisch aus und erörtert den Einfluß der Konstruktion auf die Emissionsparameter. Des weiteren berichtet der Verfasser über eine neue konstruktive Lösung für „M"-Kathoden in welchen das poröse Wolfram durch eine mehrlagige Wolframdrahtwicklung ersetzt wird. Die Herstellung der „L"-Kathoden wird diskutiert, ferner einige Probleme der gepreßten und gesinterten porösen Körper und die Emissionseigenschaften der so hergestellten Dioden.

IRODALOM

1. LANGMUIR: Phys. Rev. 22.357, 1923 Dushman Rev. Mod. Phys. 2, 398, 1930
LANGMUIR: Kingdon Proc. Roy. Soc. 107, 61, 1925
2. S. M. DE BOER: Elektron Emission and Adsorption Phenomene Cambridge University Press, London 1935
G. HERMANN and S. WAGENER: The Oxide-Coated Cathode Chapmann and Hall, Ltd. London vol. 2, 1951
3. G. E. MOORE and H. W. ALLISON: Phys. Rev. 77, 246—257, 1950
4. H. J. LEMMENS, M. J. JANSEN and R. LOOSJES: Incandescible Cathode U. S. patent No. 2. 543—728 jul. 1948
H. J. LEMMENS, M. J. JANSEN and R. LOOSJES: Ein neue thermisch-emittierende Kathode für schwere Belastungen
5. E. S. RITTNER and F. K. DU PRE: Phys. Rev. 82, 573, 1951
6. I. BRODIE, R. O. JENKINS: Journal Elektronics 457—476, márc. 1957 Evaporation of Barium from Impregnated Cathodes
H. KATZ: Journal of Applied Phys. Vol. 24, 5, 1953. Metallcapillary Cathodes
7. R. O. JENKINS and W. G. TRODDEN: Journal of Elektronics and Controll Vol VII. 5, 393/395, 1959. The Poisoning Impregnated Cathodes
8. A. CLASSEN, C. F. VEENEMAN: Z. F. Phys. 80, 342, 1933. Dampfdruckbestimmungen von BaO, SrO, CaO und deren Mischungen aus Verdampfungsgeschwindigkeitsmessungen
9. E. S. RITTNER, R. H. AHLERT and W. C. RUTLEGDE: Journal Applied Phys. Vol. 28, 2, 156, 1957
10. BUDINCSEVICS A., BARLA E.: Távközlési Kutató Intézet Közleményei I. 2, 63, 1955. Porózus wolframtest külső felületének és porozitásának gyors meghatározása
11. *Patended apr. 5, 1960. 2, 931, 934:* Indirectly Heated Supply Cathode. U.S.A.
Szab. száma 144.881, 1955. febr. 5.: Közvetett fűtésű tartalékkatóda
12. P. P. COPPOLA and R. C. HUGHES: Proceedings of the IRE, A New Pressed Dispenser Cathode

ÚJABB KUTATÁSI EREDMÉNYEK LÉGMENTESEN LEZÁRT MINIATŰR EZÜST-CINK AKKUMULÁTOROK TERÉN..

HAJDU LÁSZLÓ* és ZAHORÁN JÁNOS**

[Beérkezett: 1970 október 29]

A légmentesen lezárt akkumulátorokból felépített telepek hátránya, hogy a telep egy cellája, — a legkisebb kezdeti kapacitású — van a használat során a legnagyobb igénybevételnek kitéve, és ennek a következménye az, hogy: 1. a megkívánt hosszú élettartamot nem biztosítja és 2. a telep élettartamának meghatározójává válik. Szerzők ismertetik a leírt hátrányokat kiküszöbölő ún. „kettős depolarizátoros" rendszer működését, melynek lényege, hogy az ezüstoxid fő-depolarizátor mellett egy második főleg kadmiumoxidból álló depolarizátort is alkalmaznak. Ez lehetővé teszi egy a névlegesnél alacsonyabb feszültségszint kialakítását a cellakarakterisztikában. A második feszültséglépcső kedvező terhelési paraméterei lehetővé teszik a cellák telepben történő átpolarizálódásának megakadályozását és a telepek használatában hosszú élettartamot tesznek lehetővé. Az ezüstelektród működési mechanizmusának vizsgálatán túlmenően a szerzők ismertetik olyan kísérleti ezüst-cink akkumulátor paramétereit, melyet a hagyományos felépítésűhöz képest változatlan névleges kapacitással lehet üzemeltetni az ezüst ún. „monoxid-fázisában". Ezt a depolarizátorban ólomadalék alkalmazásával lehetett elérni. Az „ezüstmonoxid" fázisban működő akkumulátor az élettartam további növelését teszi lehetővé.

1. Bevezetés

A második világháború befejezése után a híradástechnika és műszertechnika hatalmas méretű fejlődésének egyik jellegzetességévé vált a miniatürizálás világméretű tendenciája. A ma már nem ritkán mikroszkópikus méretű miniatűr hiradás- és műszertechnikai alkatrészek mellett a készülékekben viszonylag nagy helyet foglalnak el a táplálásukra szolgáló áramforrások.

A fejlődés első időszakában az áramforrások kizárólag különféle szárazelem típusok voltak, amelyek kis térfogat és súly mellett viszonylag nagy energiatároló képességgel rendelkeztek. A piaci igények rohamos növekedésével a világ szárazelemipara alig képes lépést tartani, így a szárazelem ma világviszonylatban is hiánycikk. Ugyanakkor egyre inkább előtérbe lépnek a gazdaságossági kérdések is, nevezetesen az, hogy az általánosan elterjedt és viszonylag olcsó típusok a raktározást rosszul tűrik és még olcsóságuk ellenére is a folytonos használat mellett jelentkező gyakori pótlás tetemes anyagi terheket ró a szárazelemmel működtetett készülékek felhasználóira.

* Hajdu László Budapest II., Szilágyi E. fasor 107. Medicor Művek
** Zahorán János, Budapest XX., (Pesterzsébet), Sajó u. 6. Mechanikai Művek

Ezen okok miatt mindinkább kezdenek tért hódítani a tölthető törpeáramforrások — miniatűr akkumulátorok —, amelyeknek az elmúlt évekig legjelentősebb képviselői a nyugatnémet *Varta—Deac* konszern nikkel—kadmium rendszerű lúgos akkumulátorai voltak. Ezek a miniatűr nikkel-kadmium akkumulátorok légmentes lezárásuk révén a készülékekbe tetszőleges helyzetben beépíthetők és az előírásoknak megfelelő használatuk mellett semmiféle karbantartást nem igényelnek. Fajlagos energiatároló képességük már 1—2 cm^3 térfogatú típusokban is 60 $mWó/cm^3$. Ezeknek a típusoknak jelentős hátránya, hogy túlterhelésre igen érzékenyek. Ebben a vonatkozásban lényeges előnyökkel rendelkeznek a francia SAFT társaság szinterelt elektródájú nikkel-kadmium miniatűr akkumulátorai, viszont ezeknek fajlagos energiatároló képessége valamivel kisebb, mint a *Varta—Deac* típusoké.

2. Az ezüst-cink akkumulátorok fejlődése

Már a második világháború előtt Henri ANDRÉ francia professzor foglalkozott olyan akkumulátorok előállításának kérdésével, amelynek pozitív hatóanyaga ezüstoxid, a negatív pedig cink volt és amelyekben elektrolitként káliumhidroxid vizes oldatát használta. Az ANDRÉ által inkább laboratóriumi körülmények között előállított akkumulátorok — bár még sok gyermekbetegséggel küzdöttek — azt már egyértelműen bizonyították, hogy azonos térfogat és súly mellett 3÷4-szer akkora energiatárolóképességgel rendelkeznek, mint a közönséges ólom, vagy nikkelakkumulátorok, és emellett terhelhetőségük is lényegesen jobb, mint az előzőké. Már a kezdeti eredményekből is látható volt, hogy minden olyan helyen, ahol a nagy energiatárolóképesség és terhelhetőség mellett a kis súly és térfogat döntő tényező, ezek az akkumulátorok tekinthetők a jövő akkumulátorának.

ANDRÉ első szabadalmát 1936-ban fogadta el a Laboratorie Central d'Electricité és a második világháború kitöréséig Franciaországban mintegy 20÷25 ezer közepes teljesítményű (10÷20 Ah) ezüst-cink akkumulátort készítettek, mely azonban teljes egészében a megszálló német csapatok birtokába került.

ANDRÉ a megszállás elől az Egyesült Államokba távozott, ahol Michel YARDNEY gyakorlati közreműködésével és anyagi támogatásával folytatni tudta kísérleteit.

Ebben az időben a szabadalmi leírások tömege látott napvilágot, amelyek mind különböző konstrukciós megoldásokat tartalmaznak elsősorban az élettartam elfogadhatóvá való növelése érdekében.

Ezen munkák eredményeképpen jutottak el odáig, hogy ez az áramforrás már a második világháborúban katonai felhasználásra került. Az Egyesült

Államokban megépítették az első tengeralattjárót, melynek energiaforrása ezüst-cink akkumulátor volt („Barrasuda"). Ebbe összesen 14 to ezüstöt építettek be aktív anyagként. A világháború befejezése után pedig ANDRÉ Franciaországba visszatérve megépítette azt a gépkocsit, mely elektromos meghajtású volt (Panhard) és egyetlen feltöltéssel 400 km utat tett meg 60 km/ó átlagsebességgel.

Ezek voltak az első komolyabb próbálkozások, melyek a nagyteljesítményű áramforrás próbáit jelentették döntően azokon a felhasználási helyeken, ahol fontos a nagy energiasűrűség. (Kis súlyban és térfogatban nagy energiamennyiség.)

A háború után Franciaországban közös érdekeltségű vállalat alakult (Andyar: *Andre—Yardney)*, amely megkezdte az ezüst-cink akkumulátorok gyártását Európában. Később a szabadalmak alapján az angliai Venner Accumulators Ltd, a németországi Friemann und Wolf cég is bevezette az ezüst-cink akkumulátorok gyártását. Ezzel egyidőben a kelet-európai országokban is folytak a kísérletek és elsősorban a Szovjetunió, később több más ország is elkezdte a gyártást: Csehszlovákia, Lengyelország, Magyarország.

Az érdeklődést jelentős mértékben növelte és — minden túlzás nélkül állíthatjuk — ma már meghatározója a felhasználásnak a szuperszónikus repülés és az űrkutatás. Azon túlmenően, hogy a szuperszónikus repülőgépek áramforrása ezüst-cink akkumulátor, a Minutmann amerikai interkontinentális rakétának, a műholdaknak, űrhajóknak is teljes energiaellátására általában ilyen rendszerű áramforrásokat használnak.

Az ezüst-cink áramforrások fejlesztésében jelentős, külföldön is érdeklődésre számot tartó eredmény, hogy Magyarországon oldották meg első ízben a hermetikus kivitelű miniatűr ezüst-cink akkumulátort [1] hazai szabadalmak alapján. [2] [3]. Mindkét eljárást a gyakorlatban alkalmazzák a Medicor Művek hermetikus ezüst-cink gombakkumulátorainak és telepeinek a gyártásában.

Ezek közül az ezüstelektród aktív formában történő előállítására vonatkozik a legjelentősebb magyar eljárás, mely egyedülálló a világon és több országban szabadalmi oltalmat kapott. Ennek lényege, hogy vékony ezüsthuzal felületét teszi aktívvá elektrolítikus (anódos) klórozással, majd ezt követő katódos kezeléssel (redukcióval), melynek eredményeképpen kis szemcsés, nagy felületű aktív ezüst keletkezik. Ez az intakt huzalmagon erősen tapad és azon keresztül igen egyenletes áram hozzávezetéssel rendelkezik. Az ilyen módon kialakított aktív ezüst anódos oxidációja eredményezi az ezüst cink akkumulátor depolarizátoraként szolgáló ezüstoxid elektródot. A cinkelektród is különleges technológiával készül. A szabadalmaztatott eljárás ez esetben egy olyan strukturális tulajdonságra (és eljárásra) vonatkozik, mely egyedül alkalmas arra, hogy a cinknek hermetikusan zárt körülmények között is olyan jó reverzibilitási tulajdonságokat biztosítson, hogy belőle légmentes

akkumulátort lehessen készíteni. Lényege, hogy az elektrokémiai úton raffinált (tisztított) cink, mely megfelelő körülmények betartása esetén mohás (gyapotos) szerkezetű, olyan az elektródnak vázszerkezetet biztosító cellulóz adalékanyaggal van megfelelő homogenitásúra keverve, mely az elektród működése közben egyenletes elektrolit-ellátottságot is eredményez az elektród belsejében. Ezáltal válik lehetővé, hogy a cinkelektród tartósan (több éven át is) képes legyen reverzibilisen oxidálódni és redukálódni.

3. Az ezüst-cink akkumulátorok működési elve

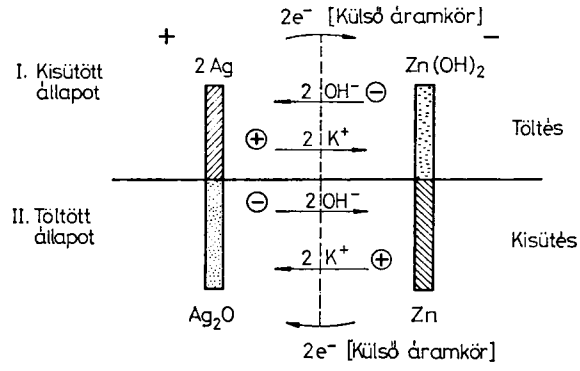
Azon áramforrások működése, amelyek kémiai energiának villamosenergiává történő átalakítása révén nyerik energiatartalmukat, azon alapul, hogy a kémiai reakció, mely az energiaszolgáltatásnak az alapja, két részre bontható és ezen két reakció topológiailag is tökéletesen elválasztva játszódik le. Ez a térbeli elválaszthatóság a galvánáramforrások működésének az alapja, és legfőbb ismérve.

A modern elektrokémiai nomenklatúra szerint minden elektronleadással járó folyamatot oxidációnak és minden elektron felvétellel járó folyamatot redukciónak tekinthetünk, vagyis elektront leadó vegyület, gyök, elem oxidálódik, és viszont, minden elektront felvevő vegyület, gyök, elem redukálódik. Ebben az értelemben minden kémiai folyamat redoxi folyamat, tekintettel arra, hogy kémiai átalakulások minden esetben elektronok (vegyértékelektronok) transzportjával kapcsolatosak, még pontosabban olyan átrendeződésével, amikor az új, keletkező reakciótermékek kialakuló közös molekula elektronpályáit a résztvevő reakciópartnerek elektrondonorként, illetőleg elektronacceptorként határozzák meg, vagy hozzák létre.

Ha egy ilyen reakcióban az elektronátadás—átvétel folyamata térben nem haladja meg a molekulanagyságot, közönséges kémiai reakció játszódik le, amit hőeffektus kísér (exoterm—endoterm reakciók). Ilyen pl. a szén elégetése.

Ha a kémiai reakció olyan „vezérelt" körülmények között játszódik le, hogy az elektron-átadás-átvétel folyamata meghatározott, megszabott úton a vezető fémszálon keresztül bonyolódik le, akkor ez az elektronáram munkára (villamos munkára) fogható, nagyságát pedig a kémiai potenciálok különbsége megszabta termodinamikai energia határozza meg. Ily módon a kémiai reakció energiájának egy része az, ami villamos energiává alakul.

Az ezüst-cink akkumulátorokban lejátszódó folyamatok az 1. ábrával szemléltethetők. Az elektródaközi teret, mely káliumhidroxid elektrolittal van kitöltve szemipermeabilis szeparátor választja el, melyen keresztül az ionok szabadon mozoghatnak. A vezetőben tehát az áramot elektronok, az elektródaközi térben pedig ionok szállítják.



1. ábra. Az ezüst-cink akkumulátorok működési elve

a) *Töltéskor:* az I. állapotnak megfelelő elektródanyagok a II. állapotnak megfelelő anyaggá alakulnak át az alábbi részfolyamatoknak megfelelően:

$$2\,Ag = 2\,Ag^{+} + 2e^{-} \tag{1}$$

$$2\,Ag^{+} + 2\,OH^{-} = Ag_2O + H_2O \tag{2}$$

$$2\,Ag + 2\,OH^{-} = Ag_2O + H_2O + 2e^{-} \quad E_{Ag/Ag_2O} = +\,0{,}344\ V \tag{3}$$

Az ezüst elektronja leadásával, amely a vezetőn keresztül a negatív elektródhoz vándorol (azt polarizálja) ezüstionokká oxidálódik az elektronhiány miatt pozitívvá polarizálódik. A most már polarizálódott pozitív elektródhoz az elektrolitban levő negatív töltésű hidroxilionok odavándorolnak, és oxigén átadásával vízzé alakulnak az ezüstelektród terében:

$$2\,OH^{-} = H_2O + 1/2\,O_2 + 2e^{-}. \tag{4}$$

Az oxigén ilyenformán beépül az ezüstelektródba.

Amikor az Ag—Ag_2O folyamat befejeződik, illetőleg az ezüst morfológiai tulajdonságaiból és a tényleges áramsűrűségtől függő mértékben előrehalad, konszekutív reakcióként az Ag_2O oxidációja is elkezdődik.:

$$Ag_2O + 2\,OH^{-} = 2\,AgO + H_2O + 2e^{-} \quad E_{Ag_2O/AgO} = +\,0{,}570\ V. \tag{5}$$

Természetesen az eltérő redoxipotenciál következtében a töltésnek ez a fázisa más potenciálszinten megy végbe. Az ezüst oxidációjának erről a kétlépcsős mechanizmusáról a későbbiekben még lesz szó, mivel ennek az akkumulátorok villamos paramétereire nézve döntő fontossága van, és ilyen oknál fogva a kutatások középpontjában áll.

A vezetőn a $Zn(OH)_2$-ből álló elektródhoz érkező elektronok az elektródot negatívvá polarizálják, aminek következtében az elektrolitban levő kálium ionok a negatív elektródhoz fognak vándorolni. Az elektródhoz érkező K^+ pozitív töltésű ionok a következő reakcióban vesznek részt:

$$Zn(OH)_2 + 2\,K^+ + 2e^- = Zn + 2\,KOH, \tag{6}$$

ahol a cinkhidroxid elektródot fémcinkké redukálják.

A másik lényeges dolog, hogy a cinkelektród kismértékben mindig oldva van $K_2[Zn(OH)_4]$, káliumcinkát formájában. Ennek figyelembevételével a reakció a következő úton is lejátszódik:

$$K_2[Zn(OH)_4] + 2\,K^+ + 2e^- = Zn + 4\,KOH. \tag{7}$$

Ezek közül mennyiségileg a 6. folyamat a döntő, mivel kisütött állapotban a negatív elektród zömmel $Zn(OH)_2$ formájában van jelen és csak kisebb része van oldva.

b) *Kisütéskor* vagyis az áramtermelés folyamata során az 1. sz. ábra alsó részén szemléltetett folyamat játszódik le, lényegében fordítottja a töltési folyamatoknak. Az ezüstoxid elektródhoz a vezetőn át érkező elektronok az elektródot negatívvá polarizálják, mely az elektrolitból a pozitív töltésű K^+ ionokat vonzza

$$Ag_2O + 2\,K^+ + H_2O + 2e^- = 2\,Ag + 2\,KOH. \tag{8}$$

és fémezüstté redukálódik. Az elektrolit hidroxilionjai a szemipermeábilis hártyán át a cinkelektródhoz vándorolnak. A cink ugyanis elektronjai leadásával pozitív töltésű cinkionokká válik, melyek a hidroxilionokat fogják magukhoz vonzani:

$$Zn = Zn^{++} + 2e^- \tag{9}$$

$$\underline{Zn^{++} + 2\,OH^- = Zn(OH)_2} \tag{10}$$

$$Zn + 2\,OH^- = Zn(OH)_2 + 2e^- \quad E_{Zn\,Zn(OH)_2} = -1{,}245V \tag{11}$$

A keletkező cinkhidroxid egy része — kálciumcinkát keletkezésével — a KOH elektrolitban tovább oldódik

$$Zn(OH)_2 + 2\,KOH = K_2[Zn(OH)_4], \tag{12}$$

a másik, nagyobb része pedig hidratált formában az elektród anyagát képezi.

Lehetséges, különösen hosszabb tárolás esetén, hogy a cinkhidroxid leadja víztartalmát és kemény, többé nem oldható cinkoxiddá alakul:

$$Zn(OH)_2 = ZnO + H_2O. \tag{13}$$

Ha megfigyeljük a feltüntetett részfolyamatokat, azok teljes egészében megfelelnek azoknak a feltételeknek, melyek a galvanikus áramforrást meghatározzák. A vezetőben az áramot elektronok, az elektrolitban ionok szállítják.

A két elektród redoxi folyamatát szemléltető (3) (5) és (11) reakció egyenlet mellett az ezüst és cink redoxi potenciáljait tüntettük fel, melyekből az áramforrás forrásfeszültsége számítható.

Összegezve az (1)—(12) folyamatokat a kettős áramtermelő reakció a következő:

$$\text{I. } AgO + Zn + H_2O = Ag + Zn(OH)_2, \quad U_{eI} = 1{,}815 \text{ V}. \tag{14}$$

$$\text{II. } Ag_2O + Zn + H_2O = 2\,Ag + Zn(OH)_2, \quad U_{eII} = 1{,}589 \text{ V}. \tag{15}$$

Fentiekkel azokat a lényeges, alapvető főfolyamatokat tárgyaltuk, melyek az ezüst-cink rendszerű akkumulátorok működésének alapját képezik. Nem hanyagolhatjuk azonban el azokat a mellékfolyamatokat sem, melyek leginkább meghatározzák az ezüst-cink akkumulátor hátrányait. Ezeket röviden a következőkben lehet összefoglalni:

1. Az ezüst-cink akkumulátorokhoz használt celofán szeparátor, de a kipróbálás alatt, vagy kutatás stádiumában levő — a celofántól alapvetően eltérő — szeparátorok is mind ez ideig nem töltik be szerepüket tökéletesen. A szeparátor többnyire élettartam-meghatározó, és ez az egyik oka annak, hogy az ezüst-cink akkumulátor élettartama jelenleg még kisebb, mint a hagyományos akkumulátoroké. A szeparátorok az elektrolitot csak korlátozott ideig tűrik, hosszabb idő múlva degradálódnak, roncsolódnak, ami az akkumulátor zárlatát okozza.

2. A pozitív elektród AgO hatóanyaga hosszabb behatás esetén a rendszerint szerves anyagokból álló szeparátor vázanyagát, vagy adalékanyagait oxidálja, s ezáltal a polimermolekulákban láncszakadást idéz elő. Ez a folyamat hozzájárul a celofán idő előtti tönkremeneteléhez. Az ezüst okozta hátrányok közé tartozik az elektród kolloidális oldódása és az ezüst kirakódása a szeparátor pórusaiban (a redukció legalább ilyen mértékű), ami a szeparátorpórusok „eltömődése" folytán a cella belső ellenállásának nem kívánt mértékű megnövekedéséhez vezet.

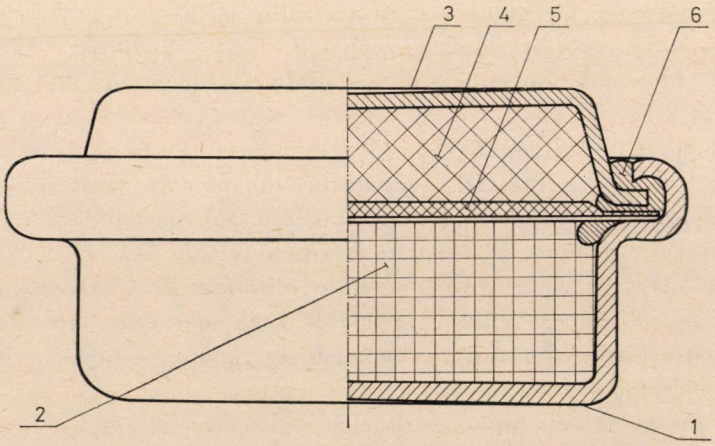
3. A cinkelektród működés közben jelentkező káros folyamatai közül a leglényegesebb, hogy a cink tartósan nem hajlandó olyan reverzibilis műkö-

désre, mint az ezüst, ami az akkumulátor egyensúlyi működési feltételeit a kezdeti értékekhez képest megváltoztatja. További hátránya, hogy azon része, mely az elektrolitban oldva van, a töltés befejező szakaszában olyan ún. dendrites (tűkristályos) formában hajlandó csak redukálódni, mely a szeparátor átszúrására hajlamos. Ez pedig az akkumulátorok zárlatát idézheti elő. Általában elmondható, hogy a tartós használat közben nem csupán a reverzibilitás romlása figyelhető meg, hanem ennek okaként az elektródban jelentős morfológiai változások is bekövetkeznek.

4. Légmentesen lezárt miniatűr ezüst-cink akkumulátorok

Amint már említettük, új utat jelent a ezüst-cink akkumulátorrendszer fejlődésében a Magyarországon kifejlesztett és már évek óta sorozatban gyártott légmentesen lezárt miniatűr ezüst-cink akkumulátorcsalád, amely egyesíti magában a légmentesen lezárt nikkel-kadmium miniatűr akkumulátorok és a „nyitott" ezüst-cink rendszerű akkumulátorok kedvező tulajdonságait. Fajlagos energiatároló képességük 120÷150 mWó/cm^3, emellett terhelhetőségük is jóval nagyobb, mint a nikkel-kadmium akkumulátoroké.

Egy légmentesen fémdobozban lezárt ezüst-cink korongalakú akkumulátor — úgynevezett gombakkumulátor sematikus szerkezetét a 2. ábra mutatja be. A korrózióálló fémlemezből sajtolással készült és belső felületén pórusmentesen ezüstréteggel bevont dobozban (1) van elhelyezve a speciálisan elkészített ezüstelektród (2). Az elektród áramhozzávezetését a fémdoboz biztosítja. Az ugyancsak korrózióálló fémlemezből sajtolt és belső felületén kettős cink amalgámréteggel bevont fedélbe (3) van bepréselve a cinkelektród (4).



2. ábra. A légmentesen lezárt ezüst-cink gombakkumulátor.

A két elektródot mikroporózus szeparátor (5) választja el egymástól. A légmentes lezárást és a doboz és fedél közötti villamos szigetelést műanyag tömítőgyűrű (6) biztosítja. Az akkumulátor összeszerelése előtt mindkét elektródot megfelelő összetételű káliumhidroxid oldattal szivatják tele, így az elektrolit gyakorlatilag minden elektródrészecskét nedvesít és biztosítja az elektródok nagyfokú aktivitását. Az előzőkben ismertetett elméleti kvalitatív működés a gyakorlatban sohasem valósul meg teljesen, a tényleges folyamatok ezeknél lényegesen bonyolultabbak. Éppen ezért már ezeknek a kis akkumulátoroknak a kifejlesztése során egy sor olyan alapvető elméleti, konstrukciós és technológiai kérdést kellett tisztázni és megoldani, amelyek együttesen teszik lehetővé a légmentesen lezárást. A légmentes lezárhatóságnak ugyanis alapfeltétele, hogy az akkumulátorokban lejátszódó elektrokémiai folyamatok olyannyira kvantitatív módon menjenek végbe, hogy sem normális töltés alatt, sem kisütés közben az akkumulátorban gázfejlődés ne jöhessen létre. Nem célunk ezen a helyen részletekbe menően ismertetni mindazokat a konstrukciós és technológiai elveket, amelyek alapján lehetővé vált ezeknek a légmentesen lezárt miniatűr ezüst-cink akkumulátoroknak az előállítása, csupán a továbbiak megértéséhez feltétlenül szükséges alapvető kérdéseket kívánjuk tárgyalni.

Az ezüstelektród célszerűen megválasztott keresztmetszetű ezüsthuzalból készül oly módon, hogy az ezüsthuzalt megfelelő fogazású fogaskerékpár között átvezetve hullámosítják, majd a hullámosított huzalból rendezetlen száleloszlású gombolyagot készítenek. Ezt a gombolyagot, — amelyben a kívánt súlyú ezüsthuzal mennyiség helyezkedik el —, megfelelő méretű koronggá sajtolják. Az összesajtolt elektród szerkezete hasonló a huzalszivacs szerkezetéhez, vagyis a hullámos ezüstszálak a szivacs sejtfalához hasonló struktúrát alkotnak. Az így kialakított ezüsthuzal „pogácsákat" megfelelő elektrokémiai eljárás segítségével jelentős részben átalakítják AgO-vá [2]. Ezen aktiválási folyamat során, ha az aktiválás mértéke megfelelő [4], a huzal belső magrésze intakt fémezüst marad és így biztosítja az elektród kiváló belső vezetőképességét az akkumulátor töltési-kisütési ciklusai alatt is. Az elektrokémiai aktiválás folyamán alkalmazott ciklusos klórozás, redukció és oxidáció már az elektród gyártása folyamán biztosítja, hogy az elektródok formált és feltöltött állapotban kerülnek az akkumulátorba beépítésre. A beépítés előtt az elektródot elektrolitban impregnálják. A cinkelektród alapanyaga nagytisztaságú, elektrokémiailag aktív „gyapotos" szerkezetű cinkraffinátum, amelyet megfelelő váztartó és elektrolitot tároló adalékanyaggal, valamint a cinknek a káliumhidroxid-oldat elektrolitban való természetes kémiai oldódását akadályozó inhibitorral kevernek [3]. Az így készült keverékből a szükséges mennyiség adagolása után sajtolással készítik a cinkelektród-pasztillát. A leírt módon készített cinkelektródot szükséges arányban káliumcinkáttal telített káliumhidroxid-oldattal szívatják tele. A helyesen megválasztott elektrolit

koncentráció mellett a cink természetes kémiai oldódása (16), amely hidrogén fejlődéssel jár, gyakorlatilag teljesen megszüntethető:

$$Zn + 2\,KOH + 2\,H_2O = K_2[Zn(OH_4] + H_2. \qquad (16)$$

A cink kémiai oldódását általában elősegítik még a nagytisztaságú cinkben jelenlevő nyomnyi mennyiségű ($10^{-4} \div 10^{-5}$%), a cinknél elektropozitívebb fémszennyeződések is, amelyek a cinkkel lokálelemet képeznek. Ezen lokálelemek anódja a cink, katódja pedig a fémszennyeződés. A lokálhatás következtében a cink anódosan oldódik és eközben a katódon — tehát szennyezésen — hidrogén válik le. Az utóbbi években igen sok kutató foglalkozik a cink viselkedésével alkálikus oldatokban és erről számtalan publikáció is jelent meg [5], [6], [7]. Ezek a kutatási eredmények a szerzők korábbi tapasztalataival teljesen egybehangzóan azt tanúsítják, hogy inhibitorként legalkalmasabb a higany alkalmazása, amely a szennyező elemeket oldva azokat oldott állapotban elosztja a cinkben és a lokálhatást minimálisra korlátozza. Ez gyakorlatilag megszünteti a spontán hidrogén fejlődést is. Az ismertetett cinkelektród éppen az alkalmazott, elektrokémiai úton előállított „gyapotos" szerkezetű és így elektrokémiai szempontból rendkívül nagyfelületű, aktív cinkalapanyag következtében terhelhető nagymértékben az áramtermelő folyamatok (14. és 15.) során, ugyanakkor töltés közben — amikor a cinkhidroxid fémcinkké redukálódik, — a megfelelően kialakított struktúra miatt kevéssé hajlamos a már korábban ismertetett dendrites kristályképződésre, így nagymértékben kíméli a szeparátort és megnöveli az akkumulátor élettartamát.

Az alkalmazott mikroporózus szeparátor jóminőségű regenerált cellulózhártya (celofán) több rétegének egymásra rétegezésével készül. A korongalakú szeparátor — amint az az ábrán is jól látható — a záróperemben membránszerűen úgy van rugalmasan befogva, hogy az a két elektród-teret egymástól tökéletesen elszeparálja, de lehetővé teszi a szeparátoron keresztül a működéshez szükséges iontranszportot.

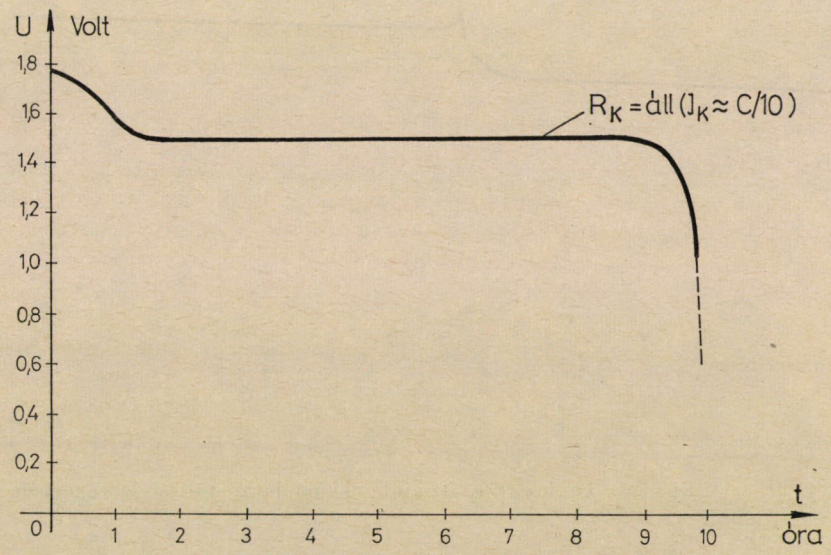
Az elektródok porozitása tervezett és úgy van megválasztva, hogy az általuk, valamint a szeparátor által felszívott elektrolitmennyiség az akkumulátorban lejátszódó reakciókhoz szükséges mennyiséget biztosítsa.

A beépített és aktivált hatóanyag mennyiségek úgy vannak meghatározva, hogy azok a szerelést követő első kisütés során — amely még a gyártási folyamat szerves része — az akkumulátor névleges kapacitásának minimálisan kétszeresét biztosítsa. Ezt a cinkelektród megfelelő méretezésével érik el, s így az első kisütés során a cink-hatóanyag teljes átalakulása szabja meg az akkumulátorból kisüthető töltésmennyiséget. A pozitív hatóanyag (ezüstoxid) mennyiségét viszont úgy kell meghatározni, hogy a cinkhatóanyag teljes átalakulása után még maradjon aktív pozitív hatóanyag, mert ellenkező esetben a (17. szerint) pozitív hatóanyag teljes redukciója után,

$$2\,H_2O + Zn = Zn(OH)_2 + H_2, \qquad (17)$$

a még megmaradó cink a pozitív elektródon végbemenő H_2 depolarizációval, tehát pozitív oldali hidrogénfejlődés mellett oxidálódik. Ez légmentesen lezárt akkumulátor esetén nyilván megengedhetetlen.

Az ezüst-cink akkumulátorok kisütési jelleggörbéje (3. ábra) olyan, hogy az adott kisütő áram mellett a kisütés kezdete után viszonylag rövid idő

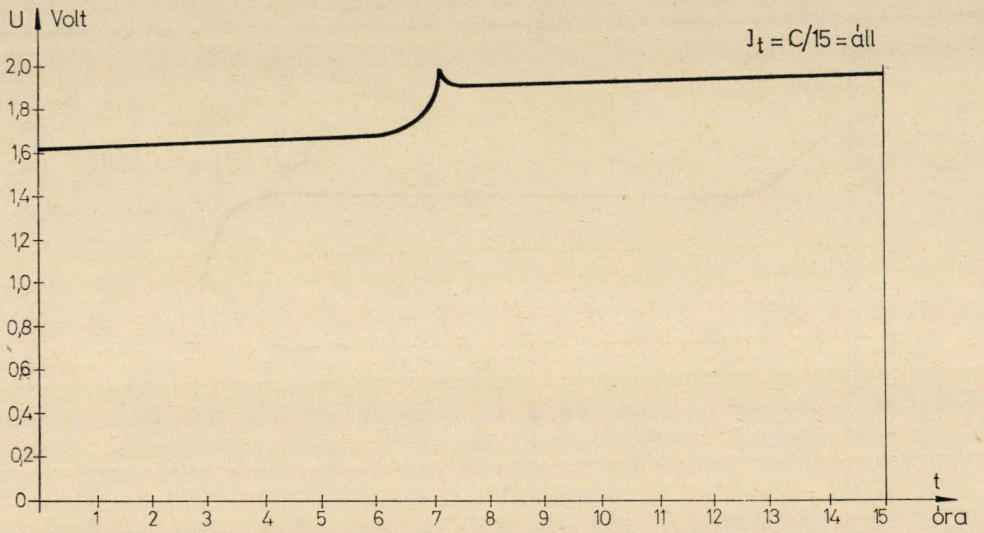


3. ábra. Az ezüst-cink akkumulátor kisütési jelleggörbéje.

alatt kialakuló névleges 1,5 V körüli kapocsfeszültségről a kisütés végén a feszültség rendkívül meredeken, rövid idő alatt csökken le gyakorlatilag nulla voltra. A fogyasztókészülékek szempontjából ez a nagyon előnyös tulajdonság, azonban gyakorlatilag lehetetlenné teszi azt az üzemeltetési előírást, amelyet minden más akkumulátorrendszernél alkalmaznak, hogy előírják a névleges feszültségnél nem lényegesen kisebb kisütési végfeszültséget, mert ezt — éppen a feszültség meredek letörése miatt — úgysem lehet megtartani. Ezért — az elsősorban laikusok által, tehát nem szakszerű körülmények között használt — miniatűr ezüst-cink akkumulátoroknál a pozitív aktív hatóanyag túlméretezése mindenképpen indokolt.

A légmentesen lezárt miniatűr ezüst-cink akkumulátor töltési jelleggörbéjét a 4. ábra mutatja be. A töltési folyamatnál — amelyet az egyéb miniatűr akkumulátoroknál (nikkel-kadmium) megszokott módon 15 órás töltési időre és ennek megfelelően I_t = C/15 töltőáram mellett végeznek — jól érzékelhető

az ezüst két oxidációs lépcsőjének megfelelő két egymást követő feszültséglépcső. Az első — az Ag_2O képződésének megfelelő — feszültségszint az összes töltési időnek és ezzel a betöltött kapacitásnak mintegy 45%-át teszi ki, egy jóminőségű „nyitott" rendszerű nagyteljesítményű ezüst-cink akkumulátor töltéséhez hasonlóan. Érdekes megfigyelni, hogy annak ellenére, hogy a töltési



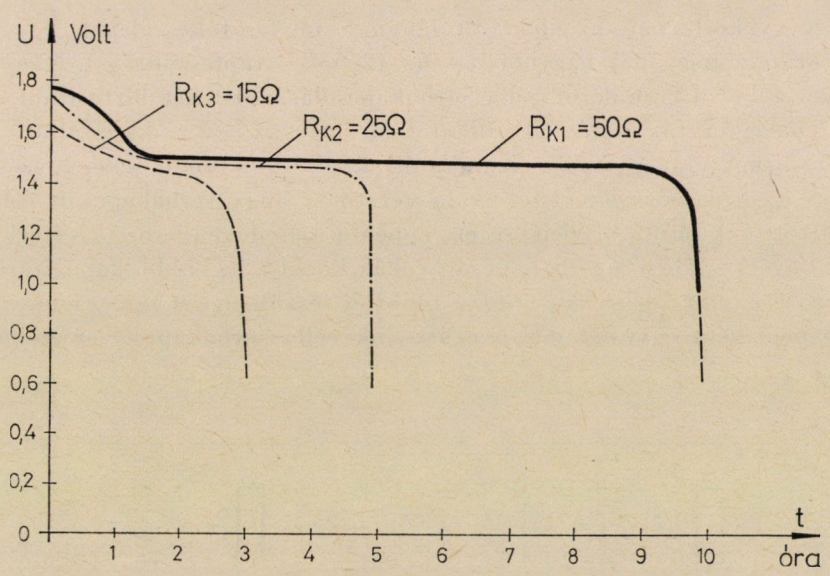
4. ábra. A légmentesen lezárt ezüst-cink akkumulátor töltési jelleggörbéje.

folyamat során az akkumulátor a töltés nagyobb részét az AgO képződés nagyobb potenciáljának megfelelő feszültségen veszi fel, a kisütés során ennek a nagyobb potenciálnak megfelelő feszültségszint csak a kisütési idő első perceiben jelentkezik (3. ábra) és a feszültség viszonylag rövid idő alatt folyamatosan csökken le az Ag_2O-nak megfelelő feszültségszintre. E kérdés részletes taglalására 6. fejezetben még visszatérünk.

A Magyarországon kifejlesztett miniatűr ezüst-cink gombakkumulátor sorozatot főbb műszaki jellemzőikkel és a csereszabatos nikkel-kadmium típusokkal való összehasonlításban az I. táblázatban ismertetjük. Az egyes típusok energiatároló képességének összehasonlítása a csereszabatos nikkel-kadmium típussal jól érzékelteti a $2 \div 3$-szoros fajlagos energiatárolóképességeket is. A nagy energiatárolóképesség mellett az elektródok nagy aktivitása és kis belső ellenállása miatt ezek az akkumulátorok nagymértékben túlterhelhetők anélkül, hogy a túlterhelés akár a kapacitásukat, akár az élettartamukat lényegesen csökkentené. Az 5. ábrán a B 300 tip. 1,5 V névleges feszültségű és 300 mAó névleges kapacitású akkumulátor kisütési jelleggörbéit

I. táblázat

1 Típus	Méretek (mm) ±0,1		4 Névleges feszültség V	5 Névleges kapacitás mAó	6 Névleges energiatároló kép. mWó	Csereszab. nikkel-kadmium			6/9
	2 átmérő	3 magasság				7 típus	8 gyártmány	9 mWó	
B 50	11,5	5,2	1,5	50	75	20 DK	DEAC	24	3,1
B 80	15,5	6,0	1,5	80	120	50 DK	DEAC	60	2
B 150	20,0	6,3	1,5	150	225	—	—	—	—
B 200	20,0	7,0	1,5	200	300	D 0,1	Szovjet	120	2,5
B 300	25,0	6,4	1,5	300	450	150 DK	DEAC	180	2,5



5. ábra. A B 300 tip. ezüst-cink akkumulátor kisütési jelleggörbéi különféle terhelő ellenállásokkal

mutatjuk be 50 Ohm ($I = C/10$), 25 Ohm ($I = C/5$) és 15 Ohm ($I = C/3$) kisütő ellenállások mellett.

A töltési jelleggörbe ismertetésénél feltünhetett az, hogy $C/15$ töltőáram, vagyis a névleges kapacitás tizenötöd részének megfelelő töltőárammal a töltést 15 óra hosszat folytattuk, tehát a töltés során éppen a névleges kapacitásnak megfelelő töltésmennyiséget töltöttünk be, ugyanakkor az 5. ábra kisütési jelleggörbéinek értékelése alapján a kisüthető töltésmennyiség is gyakorlatilag megegyezik a névleges kapacitással. Az ezüst-cink akkumulátorok további előnyös tulajdonságai közé tartozik, hogy áramkihasználásuk

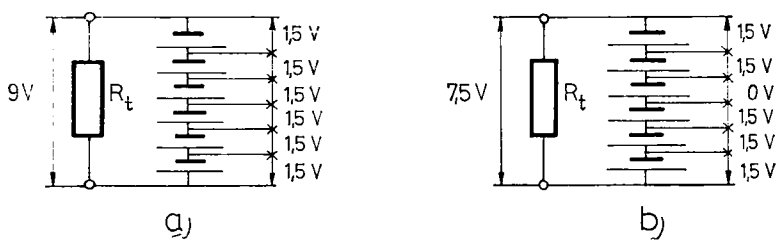
közel 100%-os, így a gyakorlatban megfelelő az üzemeltetés, ha az akkumulátorokba mindig a névleges kapacitásnak megfelelő töltésmennyiséget töltik be.

5. Az átpolarizálódás problémája és ennek kiküszöbölése légmentesen lezárt ezüst-cink akkumulátoroknál

Az ezüst-cink akkumulátorok 3. ábrán látható jellegzetes kisütési jelleggörbéje nagy előnyt jelent a jobbára állandó tápfeszültséget igénylő fogyasztókészülékek szempontjából. A kisütés végén jelentkező gyors feszültségletörés is előnyösnek látszik, mert jól indikálja az akkumulátor kisütött állapotba való jutását.

A gyakorlatban azonban általában a fogyasztókészülékek egy akkumulátor feszültségénél nagyobb — 6÷12 V — tápfeszültséget igényelnek, amelyet több akkumulátor cella sorbakapcsolásával lehet biztosítani.

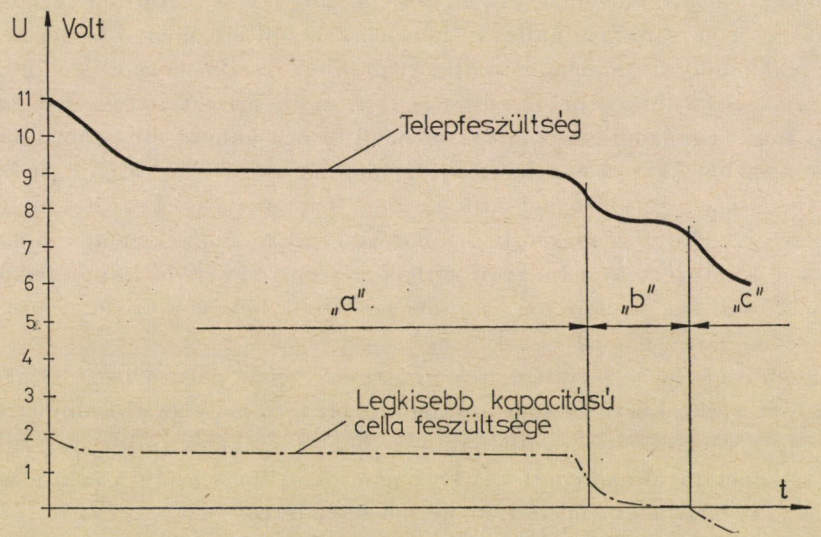
Tömeggyártás esetén elkerülhetetlen, hogy az egyes akkumulátor cellák között kismértékű gyártási, áramhatásfokbeli és hasonló jellegű szórás ne legyen. Ezek a szórások viszont oda vezetnek, hogy sorbakapcsolt cellákból kialakított akkumulátortelep esetén, éppen a meredeken letörő kisütési jelleggörbe következtében a sorbakapcsolt cellák közül a legkisebb kapacitású cella valamivel hamarabb sül ki, mint a többi és feszültsége 0 V-ra csökken. A 6. ábrán példaként egy hat darab ezüst-cink cella sorbakapcsolásával kialakí-



6. ábra. 9 V kapocsfeszültségű telep kapcsolási sémája

tott 9 V névleges feszültségű telepet mutatunk be szimbolikus ábrázolásban. Amíg minden cella résztvesz az áramtermelő folyamatban, addig a hat cella egyenként 1,5 V-os feszültségének eredőjeként a telep feszültsége 9 V körüli érték (lásd a 7. ábra „a" jelű szakaszát). A 6. b. ábrán azt az állapotot mutatjuk be, amikor a legkisebb kapacitású cella már éppen kisült és feszültsége 0 V-ra csökkent. Ebben az esetben a telep eredő feszültsége 7,5 V körüli érték (a 7. ábra „b" jelű szakasza). A 9 V névleges feszültségű fogyasztókészülékek

azonban ezen, sőt még ennél kisebb tápfeszültség mellett is jól működnek. Így a már kisült cellán tovább folyik át az R_t ellenállással reprezentált fogyasztó, és a lecsökkent telepfeszültség által meghatározott kényszerkisütő áram, amelynek az lesz a következménye, hogy a kisült cella ellentétes polaritással kezd el töltődni, miközben a telep kapocsfeszültsége tovább csökken. Ezt a jelenséget átpolarizálódásnak nevezik és ez az összes egyéb akkumulátor-rendszernek is legproblematikusabb kérdése. Különösen nagy gondot okoz ez légmentesen lezárt ezüst-cink rendszer esetén, mert a 7. ábra „c" jelű szakaszá-



7. ábra. 9 V kapocsfeszültségű telep kisülési folyamata

ban az átpolarizálódott cellában, — még a pozitív hatóanyag túlkapacitáltsága esetén is, amikor a pozitív elektród térben hidrogén depolarizáció nem jöhet létre —, a negatív elektród térben az oxidálható cink teljes átalakulása után a

$$Ag_2O + Zn(OH)_2 = 2\,Ag + Zn(OH)_2 + 1/2\,O_2 \qquad (18)$$

reakció értelmében oxigén fejlődik. Ez a folyamat a ciklusok során még csak fokozódik, és végső soron a légmentesen lezárt cella felpuffadásához és így tönkremeneteléhez vezet. Ennek következtében a soros teleppé összeépített ezüst-cink akkumulátorok ciklusélettartama általában jóval alatta marad az egyedi cellaként működtetett ezüst-cink akkumulátorénak.

Ez a tény indította a szerzők irányítása alatt álló kutatócsoportot arra, hogy az átpolarizálódás megakadályozása érdekében olyan megoldást dolgoz-

zon ki, amelyik a hasonló célt szolgáló ismert és általában rendkívül bonyolult megoldások [8], [9] helyett egyszerű konstrukciós megoldással olyan kettős depolarizátorrendszert épít be az akkumulátorokba, amelyik az Ag_2O-ra jellemző 1,5 V körüli kapocsfeszültség letörése után ettől jelentősen eltérő (0,3÷0,6 V nagyságrendű) második feszültséglépcsőt biztosít még a kényszerkisütőáramnak megfelelő polarizáció esetén is [10].

Ez a lényege a legújabban elfogadott magyar szabadalomnak, melyet a Medicor Műveknél már alkalmazásba vettek és megoldja a légmentesen lezárt akkumulátor cellákból épített sorbakapcsolt telepek tartós üzemeltetésének problémáját. Ez a megoldás azt biztosítja, hogy a legkorábban kisült cella feszültsége nem csökken nullára, hanem a beépített második depolarizáló anyag cinkanóddal szembeni feszültséglépcsőjén tovább működik mindaddig, amíg az összes többi cella feszültsége is el nem éri ezt a feszültségszintet, feltéve, hogy a második depolarizátor mennyisége akkora, hogy az adott terhelőáram mellett képes ennek az időtartamnak megfelelő kapacitást biztosítani. Visszatérve az előző példánk szerinti 9 V névleges feszültségű telepre, és feltételezve, hogy a második depolarizáló anyag cinkkel szembeni potenciálja 0,4 V körüli érték, a 6 darab sorbakapcsolt cella eredő kapocsfeszültsége abban az esetben, amikor már minden cellában bekövetkezett az ezüstoxid teljes redukciója: $6 \times 0{,}4 = 2{,}4$ V lesz.

Ezen a névleges feszültségnek mintegy 37%-át jelentő feszültségen már egyetlen fogyasztókészülék sem működik, jelezvén, hogy az akkumulátortelep már kisült. Természetesen ebben az esetben a cinkelektródot az ezüstoxid elektród kapacitásához képest túl kell méretezni, hogy a (19 szerinti) oxigénfejlődés a negatív elektród-térben ne jöhessen létre.

Másodlagos depolarizátoranyagként szóbajöhet minden olyan fémoxid, amelynek redoxi-potenciálja alkálikus közegben 0,9÷1,2 V-tal kisebb mint az ezüstmonoxid +0,344 V-os redoxipotenciálja.

A kiválasztásnál azonban még egy sor szempontot kell szem előtt tartani:

a) az alkalmazott fémoxid, de maga a redukált fém se oldódjék számottevően (10^{-4} mol) az alkalmazott lúgos elektrolitban, mert az oldott hatóanyag lassan bediffundál a pozitív elektród-teret a negatívtól elválasztó szeparátorba és ott a ciklusok során kiredukálódva átvezetést, vagy súlyosabb esetben belső zárlatot hoz létre a két elektródtér között.

b) A fémoxid vagy redukált fém jelenléte ne növelje az egyébként is metastabil (11) AgO-nak alkálikus oldatban jelentkező spontán bomlását ($2\,AgO = Ag_2O + 1/2\,O_2$), ami oxigén fejlődéssel jár.

c) Az alkalmazott fémoxid és redukált fém rendelkezzék olyan jó vezetőképességgel, — vagy megfelelő beavatkozással vezetőképessége olyan mértékben javítható legyen —, hogy jelentős mértékű ohmikus polarizáció ne tudjon létrejönni.

Az idevonatkozó széles körű kutatómunka részeredményei alapján a kadmiumoxid (CdO) alkalmazása mellett született döntés. A CdO alkálikus oldat jelenlétében azonnal átalakul kadmiumhidroxiddá a

$$CdO + H_2O = Cd(OH)_2 \tag{19}$$

reakció szerint.

A $Cd—Cd(OH)_2$ redoxi rendszer redoxipotenciálja

$$Cd + 2\,OH^- = Cd(OH)_2 \qquad E_{Cd,Cd(OH)_2} = -0{,}815\ V, \tag{20}$$

amint összevetve az Ag_2O (3 szerinti) +0,344 V-os redoxipotenciál értékével, a $Cd(OH)_2$ redoxipotenciálja +0,344 — (—0,815) = 1,159 V-tal kisebb mint az Ag_2O redoxipotenciálja, és így a cinkanóddal szembeni potenciálja, 1,589 — —1,159 = 0,43 V, így a kívánt célnak megfelel.

A $Cd(OH)_2$ és Cd alkálikus közegben gyakorlatilag oldhatatlan, így az *a)* pontban rögzített kívánalomnak maradéktalanul eleget tesz. Az AgO alkálikus közegben mutatkozó stabilitási kérdéseire a későbbiekben még részletesebben visszatérünk. Ezen a helyen csupán azt közöljük, hogy saját vizsgálataink szerint is, Tvarusko [11] újabban publikált idevonatkozó igen részletes vizsgálataival teljes összhangban, az AgO kadmium szennyezése annak stabilitását még inkább növeli, mint csökkenti, nemcsak polarizálatlan, hanem az AgO elektrokémiai képződésének megfelelő polarizált állapotban is, ami csökkenti az oxigénfejlődést. Valószínűnek látszanak azok a feltevések, amelyek az oxigén túlfeszültség befolyásolásában keresik a jelenség magyarázatát. Eszerint a kadmium alkalmazása megfelel a *b)* pont szerinti kritériumnak is.

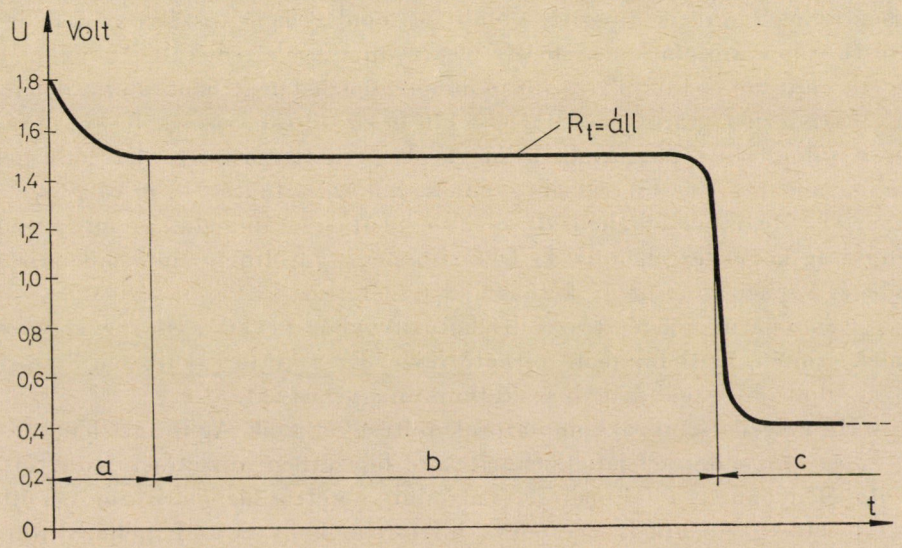
Komoly problémát jelentett viszont a $Cd(OH)_2$ rendkívül rossz vezetőképességének ténye, ami az összes előnyös tulajdonság mellett sem teszi alkalmassá a $Cd(OH)_2$-ot második depolarizátor céljaira. Logikusan vetődött fel a gondolat, hogy a problémát vezetői adalékanyaggal oldjuk meg. Ennek egyik járható útja, hogy az AgO hatóanyagot, — amelynek vezetőképessége oxidált formában és Ag-vé redukált alakban is rendkívül jó —, a CdO vagy $Cd(OH)_2$-vel keverjük össze. Ez a megoldás azonban egyszersmind azt jelenti, hogy a gyakorlatban igen jól bevált, stabil és nagy ciklusélettartammal bíró [2] szerinti ezüsthuzalból készült ezüstelektród használatáról le kellett volna mondani. Ezért azt a technikai megoldást választottuk, hogy a megfelelően méretezett és kívánt kapacitású elektrokémiailag aktivált ezüsthuzal — elektród mellé beépítésre kerülő CdO másodlagos depolarizátor vezetőképességét úgy javítottuk meg, hogy az önmagában is kívánt mértékben terhelhető legyen, túlzott ohmikus polarizáció kialakulása nélkül. Vezetői adalékanyagként

csak olyan anyag jöhet szóba, amely a rendszer szempontjából vagy inert módon viselkedik (nem oldódik, nem oxidálódik vagy redukálódik, nem csökkenti az oxigén túlfeszültségét stb.), vagy pedig a ciklusok során aktívan és hasznosan vesz részt a reakciókban.

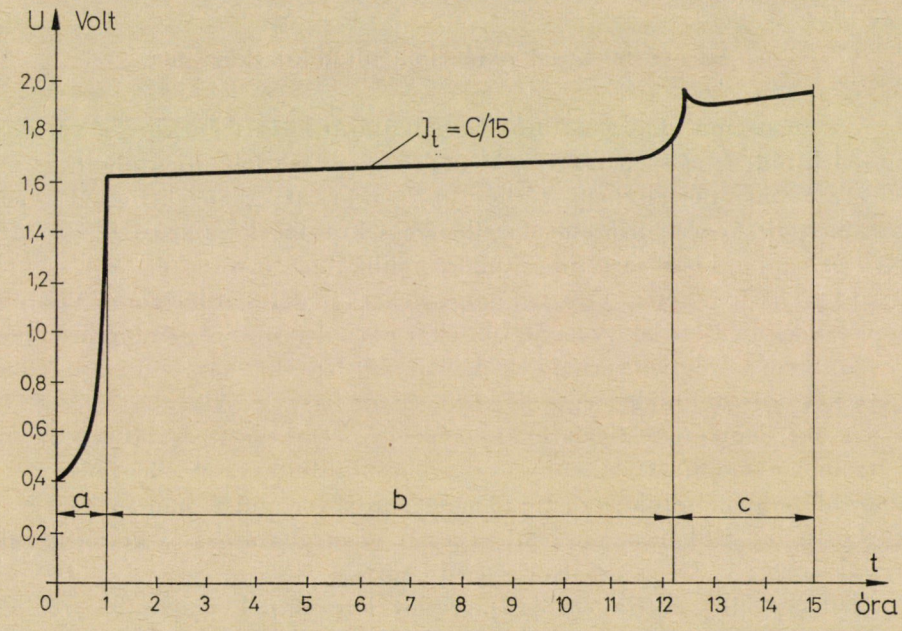
A vizsgálatok során megállapítást nyert, hogy a legcélszerűbb vezetői adalékanyag a CdO porhoz hozzákevert nagytisztaságú, elektrokémiailag aktív ezüst por. Megfelelő arányú összekevert és kívánt mértékű porozitásra összesajtolt CdO-Ag másodlagos elektród terhelhetősége olyan kiváló, hogy akkumulátorba építve, névleges terhelő árammal terhelve a polarizáció mindössze 30 mV körüli érték. A megfelelő finomságú és eloszlású, elektrokémiailag aktív ezüstpor alkalmazása vezetői adalék anyagként még azzal az előnnyel is jár, hogy az aktív állapotban összeszerelt akkumulátor első kisütését követő töltése során ez az ezüst is nagymértékben oxidálódik és a későbbi ciklusok során is résztvesz a folyamatokban. Az ebből származó előnyök és további fejlesztési lehetőségek részletes tárgyalására a 6. fejezetben még visszatérünk.

Az előzőkben közölt elveknek megfelelően megtervezett akkumulátorok jellegzetes kisülési és töltési karakterisztikáját a 8. ábrán mutatjuk be. A kisütési jelleggörbén (8. a. ábra) jól látszik az AgO redukciójának (5) megfelelő „a" szakasz, az Ag_2O redukciójának (3) megfelelő „b" szakasz, majd ezt követően a kadmiumhidroxid redukciójának megfelelő „c" szakasz. Itt kell megjegyezni, hogy a beépítésre kerülő CdO mennyiséget széles határok között lehet változtatni. A célszerűen megválasztott CdO legalább annyi, hogy a terhelhető Cd fázis névleges kisütőáram esetén biztonsággal 3÷4 órai kisütési időnek feleljen meg. Ehhez természetesen a cink mennyiséget is úgy kell megválasztani, hogy az ezüsthatóanyag teljes redukciója után még képes legyen biztosítani a $Cd(OH)_2$ redukcióját is. Normál kisütés során, amikor a kisütést a Cd fázis elérése után rövid idő múlva megszüntetik, még jelentős mennyiségű fém cink van a negatív elektródban. Ez — vizsgálataink szerint — előnyös a cink elektród reverzibilitása szempontjából. Ennek elfogadható magyarázata, hogy a megmaradó fém cink részecskék, — amelyeknek struktúrája az előállítás következtében rendkívül kedvező —, a töltés során visszaváló fém cink számára kristályosodási gócokat jelentenek és kedvezően befolyásolják a visszaváló cink struktúráját is.

A 8. b. ábrán látható töltési jelleggörbe, amelyet a 4. ábrával való jó összehasonlíthatóság kedvéért szintén C/15 töltőárammal való töltésnek megfelelően rajzoltunk meg, három jól elkülöníthető szakaszra oszlik. Az „a" szakasz jelenti az előző kisütés során kisütött Cd fázis visszatöltését, a „b" az Ag_2O-nak, a „c" pedig az AgO-nak megfelelő szakaszt. Figyelemre méltó a 4. ábrával való összehasonlításban a „b" szakasz jelentős meghosszabbodása a „c" szakasz rovására. Ennek kettős oka van: egyrészt a kettős depolarizátorral ellátott akkumulátoroknál a kisütés során beépített teljes ezüstoxid-meny-



8/a. ábra. Kettős depolarizátorral készült akkumulátor kisütési jelleggörbéje



8/b. ábra. Kettős depolarizátorral készült akkumulátor töltési jelleggörbéje

nyiség redukálódhatik a pozitív oldali H_2 depolarizáció veszélye nélkül, így a töltésre való kapcsoláskor a pozitív elektródban csak redukált Ag van jelen. A gyakorlati tapasztalatok szerint jó minőségű ezüstelektródokra az a jellemző, hogy aktív ezüst grammonként 160÷170 mAó töltést vesznek fel Ag_2O fázisban a (3) szerinti potenciálnak megfelelő feszültségszinten. Ez lényegesen kisebb, mint a (3) és (5) reakcióegyenletekből számítható 248 mAó/g-os elméleti érték. Mégis az alkalmazott és első kisütés során redukált aktív ezüstmennyiség következtében az Ag_2O fázisban visszatölthető töltésmennyiség a névleges kapacitás mintegy kétharmad részét teszi ki.

Ehhez járul másrészt az CdO hatóanyaghoz kevert aktív ezüst vezetői adalék szintén Ag_2O fázisban tölthető része. Ez a kettő együttesen biztosítja a 8. b. ábra „b" szakaszának szokatlanul nagy hosszát.

Ha az ezüst-cink akkumulátorok töltésüket csak Ag_2O fázisban veszik fel, ez egy sor előnnyel jár. Ezeknek, a 6. fejezetben részletesen ismertetésre kerülő előnyöknek a felismerése, valamint a kettős depolarizátor beépítése adta lehetőség, — amely már eleve biztosítja, hogy egy új (néhány töltési-kisütési ciklust teljesített) akkumulátor névleges kapacitása 80÷85%-ának megfelelő töltést Ag_2O fázisban vesz fel, — indította a szerzőket abba az irányba, hogy milyen további fejlesztéssel lehet a beépített ezüstmennyiség növelése nélkül az Ag_2O fázist úgy megnyújtani, hogy az új akkumulátor esetén közel névleges kapacitással egyezzen meg, és a ciklusok során se csökkenjen számottevő mértékben.

6. Az ezüstelektród oxidációja alkálikus közegben

Az ezüst-cink akkumulátorok megalkotását követő években a kutatások a cinkelektród- és a szeparátorproblémák megoldása felé orientálódtak.

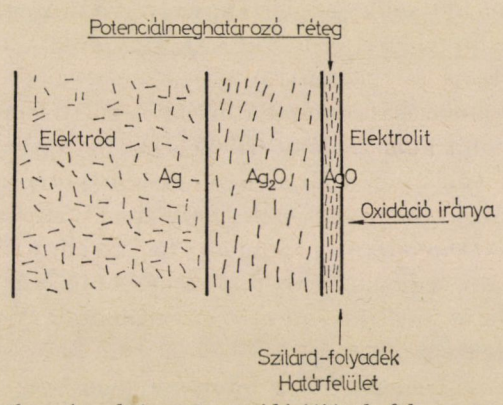
Az áramforrás általános térhódítása során, az ezüstelektródnál kezdetben tapasztalt kevesebb probléma ellenére a kutatások az ezüst felé is kiterjedtek és napjainkban igen sok munkát publikálnak erről a témáról.

Első közelítésben az ezüstnek mint elektródnak (akár huzalon levő finomszemcsés nagyfelületű aktív anyagról, akár porból sajtolt és szinterelt lemezről van szó) lúgos közegben történő oxidációja két lépésben játszódik le a jelenleg ismert két ezüstoxidnak megfelelően (3. és 5.).

A mechanizmusvizsgálatokat megelőző szerkezetvizsgálatok ma már egyértelműen eldöntötték, hogy — a korábbi feltevéssel ellentétben — a magasabb oxidációs fokú ezüstoxid nem peroxidvegyület, hanem kétvegyértékű ezüstoxid. Ebben az értelemben a helyes meghatározás a kétféle oxidra: ezüst (I) oxid (Ag_2O) és ezüst (II) oxid (AgO).

Dirkse [12] és Gaines [13] szerint létezhetnek magasabb oxidációs fokú vegyületek, mint $AgO_{1,2}$, $AgO_{1,3}$, $AgO_{1,6}$ is, ezeknél az összetételeknél

azonban inkább adszorbeált oxigén van jelen, mint kémiailag kötött. Tapasztalat szerint ezek az oxidok hosszabb időn keresztül kötve is tartják az oxigént, mely a depolarizáció (kisütési) folyamatban nem hasznosítható és leggyakrabban a kisütés során energiatermelés nélkül távozik az elektródból. Amint már láttuk, az anódos oxidáció két potenciál lépcsőn folyik le, melyek közül az első, alacsonyabb az Ag_2O az ezt követő magasabb az AgO keletkezésének felel meg. Az oxidáció az elektrolit-szilárd fázis határ felületén kezdődik és az Ag_2O keletkezése az ezüstben bizonyos mélységig folytatódik (9. ábra).



9. ábra. Az aktív ezüst oxidációjának folyamata

Amikor az Ag_2O keletkezése egy bizonyos „mélységet" elért, anélkül, hogy az ezüstrészecske teljesen átoxidálódott volna, a felületen már elkezdődik az AgO kialakulása, mely az oxidációs potenciált azonnal megemeli. Az oxigén beépülésének mechanizmusáról többféle elmélet ismeretes [12].

Bármely mechanizmus érvényesül, az akkumulátorok működése szempontjából néhány fontos megállapítást eredményeztek a kutatások, elsősorban azt, hogy az Ag_2O és AgO nem keveredett, hanem határozottan elkülöníthető fázisokban jelentkezik az elektród aktív anyagában. Az AgO sohasem keletkezik közvetlenül a fém ezüst felületén, hanem mindig csak már határozottan kialakult Ag_2O rétegen. Az AgO vezetőképessége lényegesen nagyobb, mint az Ag_2O-e, ami sok tekintetben mechanizmus meghatározó tényezővé válhatik.

További anódos oxidáció hatására nem valószínű magasabb oxidok keletkezése (szilárd oldat, vagy ötvözet kialakulása), hanem oxigén fejlődés indul meg.

Mind külföldön, mind a hazai kutatásokban vizsgálat tárgya volt, hogy milyen hatású az ezüst anódos oxidációjára a szemcseméret, a sajtolási nyomás, sűrűség illetve a szinterelési hőmérséklet. A kutatások egybehangzó meg-

állapítása az volt, hogy az aktív anyag szemcseméretének igen fontos szerepe van az oxigénfelvételre [13], míg a sajtolás módja a sűrűség inkább a mechanikus tulajdonságokra és élettartamra nézve meghatározó. A szinterelés hőmérsékletének nagyon kis maximumot mutató hatása van az anódos oxidációra [14]. A tapasztalatok szerint ha az anódosan oxidált elektródnak megfelelő áramhozzávezetése, kontaktusa biztosítva van, a polarizációs görbe első része az anódosan bevihető töltésmennyiség mintegy 1/3 részének megfelelő szakaszán az Ag_2O, a további 2/3 részének megfelelő szakaszán az AgO keletkezésének megfelelő potenciálértékeket mutatja. Általában az elméletileg kihasználható $2\ Q = 2 \times 96\ 540$ Coul/g egyenérték, vagy 496 mAó/g elméleti töltésmennyiség helyett a valóságban csak $1{,}2 \div 1{,}4$ Q, vagyis $300 \div 350$ mAó/g oxidálható be az aktív ezüstbe.

Az AgO alkalmazása akkumulátorban kétségtelenül előnyös a fajlagos töltésmennyiség jobb kihasználása érdekében. Az AgO elektrokémiai képződése már az O_2 leválás potenciáljánál magasabb potenciálon megy végbe és csak azáltal lehetséges, hogy az O_2-nek az ezüstön olyan magas a túlfeszültsége, ami a leválást az AgO oxidációs potenciálja fölé emeli. Az AgO alkalmazásának azonban hátrányai is vannak, melyekről a későbbiekben részletesen lesz szó, azért lenne kívánatos az elektród aktív anyagában az AgO/Ag_2O arányt mennél inkább csökkenteni.

Az anódos oxidációnak ez a lefolyása nem azt eredményezi, hogy a feltöltött elektródban az AgO/Ag_2O arány is 2/3 : 1/3 lesz, hanem ennél kisebb. Ez tehát azt mutatja, hogy az oxidációs polarizációgörbe nem tükrözi a mennyiségi viszonyokat, mivel a töltés második részében is keletkezik Ag_2O. Továbbmenve, az $1{,}2 \div 1{,}4$ Q betölthető töltésmennyiség elérése után (gázfejlődésig) az ilyenkor mindig jelenlevő fémezüsttel az AgO egy diszproporcionálódási folyamatban vesz részt,

$$2\ AgO + 2\ Ag = 2\ Ag_2O, \tag{21}$$

amely a mennyiségi arányokat tovább csökkenti a töltésmennyiség elvesztése nélkül.

Az akkumulátorok villamos és élettartam paramétereinek javításában döntő szerepe van annak, hogyan lehetne az Ag_2O mennyiségét a lehető maximumra emelni, anélkül, hogy a gyakorlati töltés mennyiséget ne kelljen lényegesen az 1 Q elméleti érték alá csökkenteni. A diszproporcionálódási folyamat ebből a szempontból kedvező, de túlságosan lassú. Az eddigi vizsgálatok alapján erre két gyakorlati lehetőség kínálkozott:

a) az anódos áramsűrűség csökkentése és
b) különféle hőkezelési eljárások az AgO lebontására Ag_2O-vá.

Az első eljárás az akkumulátorok használhatóságát korlátozná, hiszen az akkumulátor gyakorlatilag általában 10÷15 órás töltési ideje nem növelhető lényegesen. A második eljárással viszont egy nehezen kézbentartható technológiai eljárás válnék szükségessé, mely sok egyéb szerkezeti tényezőtől függő változó összetételű végterméket eredményezne.

A legújabb kutatási eredmények — amelyekhez a szerzők munkája is kapcsolódott — arra utalnak, hogy más úton lehetett e tekintetben kedvező eredményeket elérni. Ezek alapján talán sikerül az anódikus oxidáció mechanizmusára vonatkozóan is egy új elképzelést rögzíteni, mely az e tekintetben uralkodó sokféle feltevést kiegészíti és talán egységesíti.

A Yardney International Corp. kutatásai alapján létrejött szabadalom [15] szerint, amennyiben az aktív szemcsék mérete 1÷5 μ között változik (a gyakorlatban ennél lényegesen nagyobbat használnak), akkor az anódos oxidációs görbén mutatkozó AgO/Ag_2O oxidációs potenciálszakaszok aránya olyan, hogy 45%-ban (0,9 Q) az Ag_2O keletkezésének felel meg. Ezt követően igen rövid AgO fázis után gázfejlődés indul meg az elektródon.

GAINES [13] valamint TVARUSKO [11] az előbbi kutatóktól teljesen függetlenül a különböző fémszennyezők hatására az AgO spontán bomlását vizsgálva arra a megállapításra jutottak, hogy — valószínűleg az oxigéntúlfeszültség növelése révén — az ólom és kadmium kis mennyiségei kedvező hatásúak, csökkentik az oxigénfejlődést, ami a légmentesen lezárt akkumulátoroknál rendkívül fontos. Jelen kutatás keretében behatóan vizsgáltuk mindkét adalékanyag szerepét az anódos oxidációs (töltési) folyamatban.

A vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy a kiindulási állapotában

1. változó szemnagyságú aktív ezüstben 0,8% Pb tartalom az aktív szemcsék diszpergálódását eredményezi az egymást követő töltések során.

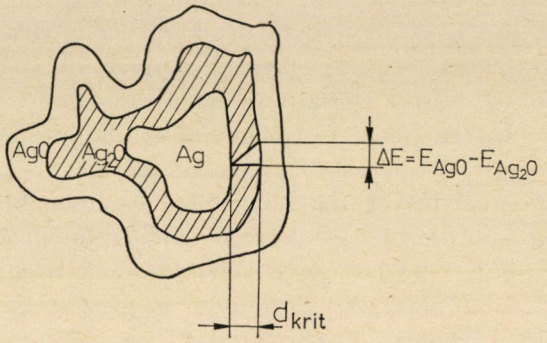
2. a diszpergálódás arányában növekvő mértékű Ag_2O potenciálszintű töltési görbéket kapunk, olyan mértékben, hogy ez számszerűen az Ag_2O fázisban működő akkumulátor előállíthatóságának eredményével kecsegtet, végül

3. az AgO spontán bomlásából oxigén fejlődés az eddigi gyakorlati értékekhez viszonyítva nagyságrenddel csökken.

Ezekből a tapasztalatokból kézenfekvőnek látszanak az alábbi feltételezések:

A *Yardney* már idézett szabadalma szerint a szemcseméretek kis frakciója azt eredményezte, hogy az anódos oxidáció során a szemcse képes gyakorlatilag teljes mértékben Ag_2O-ra oxidálódni anélkül, hogy az elektrolit–Ag_2O határfelületen megindulna az AgO képződése. Az ezt követő gázfejlődési szakasz magyarázata minden bizonnyal abban rejlik, hogy az aktív ezüstszemcsék teljesen Ag_2O-vá való oxidálása következtében a jó elektromos vezetést biztosító intakt ezüst mag megszűnik. Az Ag_2O fajlagos ellenállása ugyanis mind az ezüstnél, mind az AgO-nál több nagyságrenddel nagyobb.

Nagyobb szemcseméretek esetén (és a gyakorlatban általában mindig ez a helyzet) a teljes átoxidálódás előtt kialakul egy kritikus Ag_2O réteg (lásd 10. ábrán: d_{krit}). A kritikus Ag_2O rétegen az ezüst további oxidációja során jelentős és egyre növekvő ohmos polarizáció jön létre. Ha az ennek megfelelő feszültség eléri a két oxidációs potenciál közötti különbséget (10. ábra), akkor a szem-



10. ábra. Ezüstszemcse oxidációja

cse felületén az AgO keletkezése kisebb energiaigénnyel játszódhatik le, mint az ezüstmag további oxidációja. Az ezüst-cink akkumulátorok töltési jelleggörbéjén a potenciállépcsőnél jelentkező csúcs ez esetben az AgO keletkezésének aktiválási energiáját jelenti.

A kritikus vastagságú Ag_2O rétegben a feszültség gradiens nagysága — az eddigi tapasztalatok szerint — két meghatározó tényezőtől függ: Az egyik az Ag_2O réteg ellenállásából származó ohmos feszültségesés, a másik pedig a diffúziós gátlásból származó összetevő.

További kutatások lesznek szükségesek annak eldöntéséhez, hogy mikor melyik tényező a meghatározó, bár valószínűnek látszik, hogy a megszokott áramsűrűségek mellett a diffúzió szerepe alárendeltebb és csak jelentős áramsűrűség növelés esetén kerül előtérbe.

Az ólomadalék a — szemcsediszpergálási folyamat mechanizmusának ismerete nélkül — lehetővé teszi néhány oxidációs folyamat során olyan szemcseméret kialakulását, nagyobb méretű heterogén kezdeti összetételű szemcsékből, melyek megfelelnek a feltételezett oxidációs mechanizmusnak.

Ennek bizonyítására szolgál, hogy az Ag_2O potenciálszint növekedése nem következik be, ha kiindulási szemcseméretnek igen nagy, $50 \div 150\ \mu$ közé eső aktív anyagot használtunk. Az eredmények jelentősége különösen huzal elektródon elektrolítikus úton előállított AgCl-ből származó aktív ezüstnél nagy, tekintettel arra, hogy az áramvezetést biztosító intakt fémmag eleve biztosított és a diszpergáló hatás csupán a magon tapadó ezüstszemcsékre

érvényesül. Ily módon sikerült laboratóriumi szinten olyan *Ag_2O fázisban működő akkumulátoregyedeket előállítani*, amelyek változatlan fajlagos ezüst felhasználása mellett a névleges kapacitásuknak megfelelő töltésmennyiséget Ag_2O-nak megfelelő feszültségszinten veszik fel.

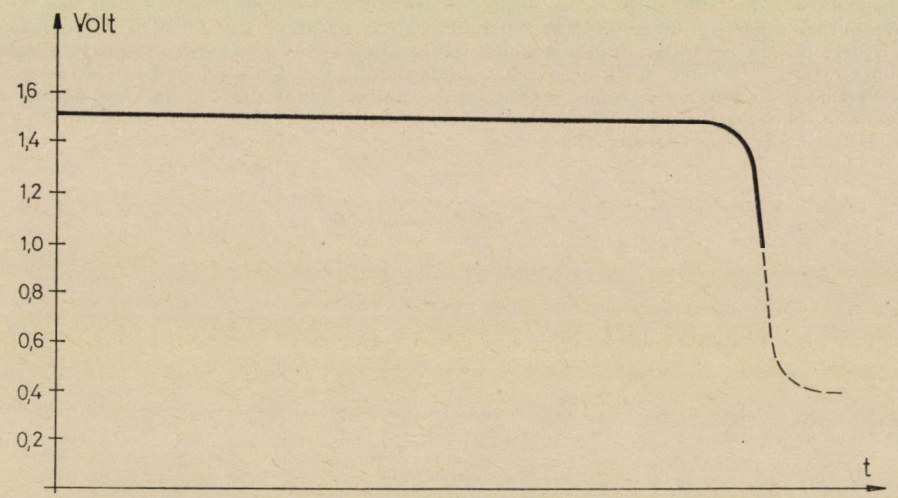
A tisztán Ag_2O fázisban tölthető ezüst-cink akkumulátorok egy sor előnnyel rendelkeznek a normál kivitelű akkumulátorokhoz képest:

a) A légmentesen lezárt kivitelben igen hátrányos oxigénfejlődés lényegesen csökken.

b) Az Ag_2O sokkal kisebb agresszivitású a szeparátorra nézve, mint az AgO. (Ehhez valószínűleg hozzájárul az AgO képződése vagy bomlása során keletkező statu nascendi oxigén oxidáló hatása is.) Az elérhető töltési-kisütési ciklusszámban ennek hatása kedvezően megmutatkozik.

c) Az Ag_2O feszültségszinten tölthető akkumulátor olyan töltőberendezéssel üzemeltethető, amelyik az AgO képződésének megfelelő mintegy 0,3 V-os feszültségugrás felhasználásával automatikusan megszünteti a töltést, és ezzel gyakorlatilag tökéletes védelmet nyújt túltöltés ellen.

d) A legkorszerűbb integrált áramkörű fogyasztókészülékek meglehetősen érzékenyek a tápfeszültség nagyságára. Ez normál kivitelű ezüst-cink akkumulátorral való táplálás esetén — ha az akkumulátort az AgO fázisban is töltik — elkerülhetetlenül oda vezet, hogy például az 1,5 V tápfeszültségre méretezett fogyasztókészülék a frissen feltöltött akkumulátor bekapcsolásakor 1,8/1,5 = 1,2 szeres feszültséget kap, amit nem visel el károsodás nélkül. Ha az akkumulátort csak Ag_2O fázisban töltjük, akkor az AgO-nak megfelelő nagyobb feszültség egyáltalán nem jelentkezik (11. ábra).



11. ábra. Állandó kapocsfeszültségű akkumulátor kisütési jelleggörbéje

IRODALOM

1. HAJDÚ, L.: Sealed Zinc-Silver Miniature Rechargeable Batteries *Medicor News* (1968.) 4.
2. HA 1386 és HA 1459 alapszámú magyar szabadalmak.
3. HA 662 alapszámú magyar szabadalom.
4. HEGYESSY, Gy.: Akkumulátorok ezüstelektródjainak aktiválása *Magyar Kémikusok Lapja* (1970) 3.
5. DIRKSE T. P.: Elektrolitic Oxidation of Zinc in Alkaline Solutions. *Journ. El. Chem. Soc.* 9. 102, 497—501 09. 1966 New York.
6. ELDER I. P.: The Elektrochemical Behaviour of Zinc in Alkaline Media *Journ. El. Chem. Soc.* 6.116, 757—762 6. 1969 New York.
7. DIGGLE—I. W. DESPIC A. R.—J. O. M. BOCKRIS: The Mechanism of The Dendritic Elektrocrystallization of Zinc *Journ. El. Chem. Soc.* 11.116, 1503—1514, 11. 1969 New York.
8. 63.547 sz. német (NDK) szabadalmi leírás.
9. 1.112.013 sz. angol szabadalmi leírás.
10. ME. 1008. alapszámú magyar szabadalom.
11. TVARUSKO A.: The Decomposition of AgO in Alkaline Solutions *Journ. of the El. Chem. Soc.* (1969), 8
12. DIRKSE T. P.: The Cathodic Behaviour of AgO in Alkaline Solution. *Journ. of the El. Chem. Soc.* (1969), 9.
13. GAINES L.: Secondary Silver-Zinc Battery Technology *Journ. of the El. Chem. Soc.* (1969), 2.
14. ZAHORÁN, J.: Az ezüst-cink akkumulátorok élettartam kérdései. (Műszaki Doktori Disszertáció V.V.E. 1965—67).
15. 905.603. sz. angol szabadalom.

New Results in Research on Hermetically Sealed Miniature Silver-zinc Storage Cells. The author presents the operation of the so-called „double depolarizer" system which essentially consists in using a second depolarizer composed mainly of cadmium oxyde, besides the silver oxyde main depolarizer. This permits to develop in the cell characteristic a voltage level below the nominal one. In addition to the operating mechanism of the silver electrode the authors describe the parameters of a storage cell which can be operated in the so-called „monoxide phase" with a capacity equal to that of a traditionally arranged cell.

Neue Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der hermetisch verschlossenen Miniatür Silber-Zink-Akkumulatoren. Die Verfasser stellen das sogenannte „Doppel-Depolarisator-System" vor, welches die nachteiligen Eigenschaften der Zelle beseitigt und welches im wesentlichen daraus besteht, daß neben dem Silberoxyd-Hauptdepolarisator auch ein zweiter, hauptsächlich aus Kadmiumoxyd bestehender Depolarisator verwendet wird. Dies ermöglicht die Ausbildung eines unter dem nominalen Niveau liegenden Spannungsniveaus in der Zellencharakteristik. Über den Wirkungsmechanismus der Silberelektrode hinausgehend besprechen die Verfasser die Parameter eines Akkumulators, dessen Nennkapazität im Vergleich zu einem herkömmliche aufgebauten Akkumulator unverändert ist und der in der sogenannten „Monoxyd-Phase" betrieben werden kann.

BORDÁS KIALAKÍTÁSÚ, ÚJSZERŰ REAKTORTARTÁLY FALÁBAN FELLÉPŐ HŐMÉRSÉKLETELOSZLÁS VIZSGÁLATA

SEBŐK FERENC*
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

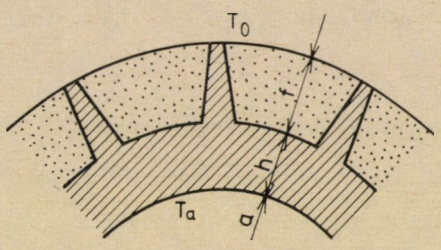
[Beérkezett 1971. március 25-én]

Jelen tanulmány tárgyát képező, újszerű, réteges reaktortartály-falban kialakuló hőmérsékleteloszlás a szokásos feladatokhoz képest két új vonást tartalmaz. Ezek: *a)* a fal belsejében működő hőforrások, amelyek exponenciális függvények összegeként írhatók le; *b)* a beton hővezetési tényezőjének a kiszáradás révén érvényre jutó hőmérsékletfüggősége. A fentiek figyelembe vétele a hengerkoordinátákban felírt Fourier-egyenlet megoldásával, a tényleges környezeti viszonyoknak megfelelő peremfeltételek alapján zárt formában elvégezhető. A levezetett összefüggés felhasználásával, gépi úton végrehajtott számítások lehetőséget adnak az egyes tényezők hatásának lemérésére.

1. A feladat megfogalmazása

Vizsgálataink tárgya egy hengeralakú, alkotóirányban bordákkal merevített, betonanyagú reaktortartály falában kialakuló hőmérsékleteloszlás meghatározása volt. Ezen újszerű szerkezet előnye abban rejlik, hogy a hőmérsékleti grádiens nagyobb része a bordaközöket kitöltő homokban vagy egyéb filler-anyagban lép fel, ami a betonra jutó termikus nyomaték közel arányos mértékű csökkenésével jár. A bordás kiképzés ugyanakkor biztosítja a szükséges merevséget.

A szerkezet geometriai elrendezését és az alkalmazott jelöléseket a tengelyre merőleges metszetben az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra

* Dr. Sebők Ferenc Budapest II., Marczibányi tér 9/b

2. A Fourier-féle egyenlet

A szilárd közeg hőmérsékleteloszlását stacionárius állapotban leíró differenciálegyenlet általános alakban

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + H = 0 . \tag{1}$$

Feltételezhető, hogy a betonanyagú hengerhéjhoz helyenként csatlakozó vékony bordák a tengelyszimmetriát lényegesen nem befolyásolják. Ugyancsak elhanyagolható a tengelyirányban történő hővezetés is. A tárgyalás ennek megfelelően egyedül a radiális koordináta függvényében végezhető, vagyis

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\lambda\frac{dT}{dr}\right) + H = 0 . \tag{2}$$

A fenti összefüggésben T a hőmérsékletet, λ a hővezetési tényezőt, H a térfogategységben keletkező hőmennyiséget jelöli.

3. A forrásfügvény felvétele

A betonanyagú hengerhéjban az elnyelődő magsugárzás hatására exponenciális eloszlású hőforrások lépnek fel [1, 2], vagyis általában

$$H(r) = \sum_i m_{1i}\, e^{-m_{2i}r}. \tag{3}$$

Korábbi vizsgálataink [3] szerint a teljes hatás leírásához nagyszámú tag szükséges. Végeredményben a vért különböző rétegeire jutó együttes hőteher a reaktorban felszabaduló hőmennyiségnek mintegy 5%-a.

Összehasonlító számítások céljaira elfogadhatónak tartjuk a betonban mintegy $m_1 = 3000$ kcal/h. m^3, illetőleg $m_2 = 1{,}0$ m^{-1} körüli értékek felvételét [4]. A fal külső rétegét képező fillerben mutatkozó hőfejlődés gyakorlati viszonyok között jelentéktelen.

4. A hővezetési tényező

4.1. Általános megjegyzések

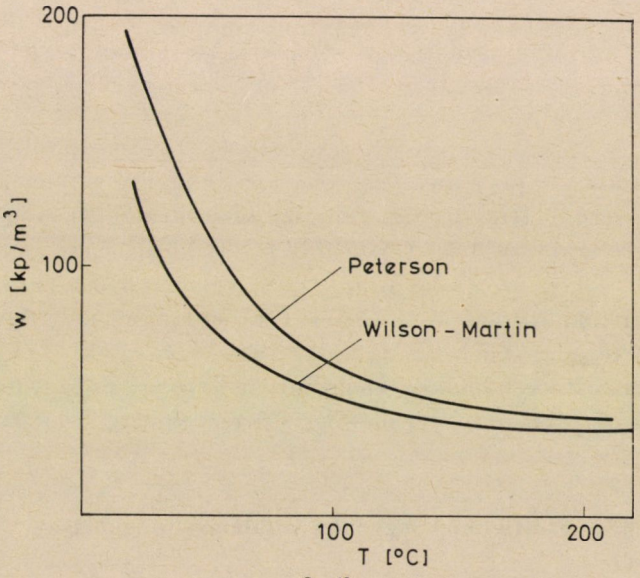
A hőtechnikai számításokban szereplő λ hővezetési tényező értékét általában konstansnak tekintik [5], ez az egyszerűsítés azonban beton esetében nem fogadható el, mivel az anyag hővezetése szoros összefüggésben áll a pórusok pillanatnyi nedvességtartalmával és ezen keresztül a hőmérséklettel.

A gyakorlat ma sok esetben THORNE [6] módszerét alkalmazza, amely a falat egy teljesen száraz és egy normális nedvességtartalmú rétegre osztja. A réteghatár felvétele önkényesen történik. A következőkben ezért a jelenségek pontosabb nyomon követésére teszünk kísérletet.

Megjegyzendő, hogy a nedvességtartalom által okozott hatáshoz képest a szilárd anyag saját hővezetőképességének a felmelegedés következtében való megváltozása elhanyagolható [7].

4.2. Kapcsolat a beton hőmérséklete és nedvességtartalma közt

A beton felmelegedés hatására bekövetkező, reverzibilis kiszáradásának mechanizmusát az irodalom [8, 9] részletesen tárgyalja. Régebbi [10] és újabb [11] vizsgálatok számszerű eredményeit a 2. ábrán közöljük. Más kutatók



2. ábra

[12, 13] ezzel szemben a számunkra érdekes, 20 és 120 °C közti hőmérsékleti tartományban megengedhetőnek tartják a lineáris kapcsolat felvételét, vagyis

$$\Delta w = - c_T T. \tag{4}$$

c_T numerikus értéke a fenti kísérletek adatai alapján, szokásos összetételű, homokoskavics- és barit-adalékú betonok esetében mintegy $1{,}0 \div 1{,}5$ kp/m³ °C. A nedvességtartalom hőérzékenysége különlegesen nagy kezdeti H_2O-tarta-

lommal rendelkező keverékek esetében a fenti értéket, amint várható is, jelentősen meghaladja [14].

4.3. Kapcsolat a beton nedvességtartalma és hővezetési tényezője között

A [13, 15]-ben közölt vizsgálatok alapján lineáris kapcsolat mutatkozik a beton nedvességtartalmának és hővezetési tényezőjének megváltozása között:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_W \Delta w \,. \tag{5}$$

λ_W értékét szokásos összetételű, homokoskavics- és barit-adalékú betonok esetében hozzávetőlegesen mintegy $4{,}5 \cdot 10^{-3}$ kcal/m. h. °C² · m³/kp-ra tehetjük.

4.4. A hővezetési tényező

A (4) és az (5) egyenlet összevonásával az alábbi összefüggés adódik

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_W(-c_T T) = \lambda_0 - \lambda_T T \,, \tag{6}$$

ahol λ_0 a normális állapotú anyagra vonatkozó hővezetési tényező.

λ_0 számszerű értéke vastag falú betonszerkezeteken végzett mérések szerint [16, 17] mintegy $1{,}4 \div 1{,}6$ kcal/h. m. °C körül van. λ_T-t az előbbiek értelmében $0{,}4 \div 0{,}6 \cdot 10^{-2}$ kcal/h. m. °C²-ra választva a száraz beton hővezetési tényezőjéül 1,0-hez közeli értéket kapunk, ami megfelel a kézikönyvekben fellelhető adatoknak.

A jól tömörített homokra vonatkozó adatokat a [18] alapján visszaszámolva, átlag-értékben 1,0-re, illetőleg 0,4-re vehetjük fel.

5. A differenciálegyenlet általános megoldása

A (2) egyenlet integrálása a (6) összefüggés felhasználásával a

$$(\lambda_0 - \lambda_T T) = -\frac{1}{r}\int_r Hr\,dr \quad \frac{c_1}{r} \,. \tag{7}$$

egyenlőséget szolgáltatja, ami egyben a hőáramra vonatkozó kifejezés. A (3)-ban felvett forrásfüggvény felhasználásával és az előjel megfordításával

$$q = \frac{1}{r}(-A_T^* + c_1) \,, \tag{8}$$

ahol

$$A_T^*(r) = \sum_i \frac{m_{1i}}{m_{2i}^2} e^{-m_{2i}^0 r}(1+m_{2i}r). \tag{9}$$

Újbóli integrálással az

$$\int_T (\lambda_0 - \lambda_T T)\, dT = -\int_r \left[\frac{1}{r}\int_r Hr\, dr + \frac{C_1}{r}\right] dr - c_2 \tag{10}$$

integrálegyenletet kapjuk. Ennek általános megoldása az exponenciális eloszlású hőforrások figyelembe vételével

$$\frac{\lambda_T}{2} T^2 - \lambda_0 T = A_T + C_1 \ln r + c_2, \tag{11}$$

illetőleg T-re megoldva

$$T(r) = \frac{\lambda_0 - \sqrt{\lambda_0^2 + 2\lambda_T (A_T + C_1 \ln r + c_2)}}{\lambda_T}, \tag{12}$$

ahol

$$A_T(r) = \sum_i \frac{m_{1i}}{m_{2i}^2}\left[e^{-m_{2i}r} \ln r - \sum_{n=1,2,3,\ldots} \frac{(-m_{2i}r)^n}{n \cdot n!}\right]. \tag{13}$$

Abban a különleges esetben, ha belső hőforrások nem működnek, $m_1 = 0$, és így A_T, $A_T^* = 0$.

6. Az integrálási állandók meghatározása

A betonhéjra (c_{1h}, c_{2h}), illetőleg az azt körülvevő töltőanyagra (c_{1g}, c_{2g}) vonatkozó, összesen négy integrálási állandó meghatározásához szükséges peremfeltételeket, a valóságos viszonynak megfelelően, az alábbiak szerint vesszük fel:

a) A beton belső felületének hőmérséklete adott, vagyis $T_{(r=a)} = T_a$;

$$\frac{\lambda_{T(h)}}{2} T_a^2 - \lambda_{0(h)} T_a = A_{Ta} + c_{1h} \ln a + c_{2h};$$

b) A beton külső és a töltőanyag-réteg belső felületének hőmérséklete azonos, vagyis $T_{h(r=a+h)} = T_{g(r=a+h)}$.

A matematikai tárgyalást jelentősen leegyszerűsíti, ha feltételezzük, hogy a réteghatárnál a két anyag hőérzékenysége azonos, vagyis

$$\frac{\lambda_{T(h)}}{\lambda_{0(h)}} \sim \frac{\lambda_{T(g)}}{\lambda_{0(g)}}.$$

Ennek felhasználásával

$$A_{T(a+h)}+c_{1h}\ln(a+h)+c_{2h}=$$
$$=\frac{\lambda_{0(h)}}{\lambda_{0(g)}}[c_{1g}\ln(a+h)+c_{2g}];$$

c) A beton-réteg külső és a filler-réteg belső felületén áthaladó hőáram nagysága azonos, vagyis

$$q_{h(r=a+h)}=q_{g(r=a+h)}.$$

A (8) összefüggés alapján, a *b.)* pont szerinti egyszerűsítéssel

$$-A^{*}_{T(a+h)}+c_{1h}=\frac{\lambda_{0(h)}}{\lambda_{0(g)}}c_{1g};$$

d) A filler-réteg külső felületén a lehülés Newton törvénye szerint megy végbe, vagyis

$$\left.\frac{dT}{dr}\right|_{(r=a+h+f)}=\varkappa(T_g-T_0).$$

A fal és a környezet közti hőátadás figyelembe vételének fontosságával szerzőnek egy korábbi dolgozata [19] foglalkozott.

A közölt összefüggésben $\varkappa$ a hőátadási tényező, amelynek értékét a [20] szerint 8 kcal/h. m.^{2} · °C-ra vehetjük fel. T_0 a környezet hőmérséklete. Amennyiben a hőmérsékleti skála eltolásával T_0-t nullára választjuk, a felvett és a számított hőmérsékleti adatok erre a referencia-értékre vonatkoznak.

Tekintettel arra, hogy a filler-rétegnek a környezettel érintkező külső felületén a nedvességtartalom csökkenése minimális értékű, a hővezetés hőfüggőségétől itt eltekinthetünk. $\lambda_{T(g)}=0$ helyettesítéssel

$$\frac{c_{1g}}{a+h+f}=-\frac{\varkappa}{\lambda_{0g}}[c_{1g}\ln(a+h+f)+c_{2g}].$$

A fentiek alapján adódó, négy egyenletből álló rendszer megoldása az integrálási állandókra az alábbi kifejezéseket szolgáltatja:

ahol

$$c_{1h}=\frac{M}{N},$$

$$M=A^{*}_{T(a+h)}\left(\ln\frac{a+h+f}{a+h}+\frac{\lambda_{0(g)}}{\varkappa}\cdot\frac{1}{a+h+f}\right)-A_{T(a+h)}+A_{Ta}-$$
$$-\frac{\lambda_{T(h)}}{2}T_a^2+\lambda_{0(h)}T_a,$$

$$N = \ln \frac{a+h+f}{a} + \frac{\lambda_{0(g)}}{\varkappa} \cdot \frac{1}{a+h+f}$$

$$c_{2h} = -\left(C_{1h} \ln a + A_{Ta} - \frac{\lambda_{T(h)}}{2} T_a^2 + \lambda_{0(h)} T_a\right)$$

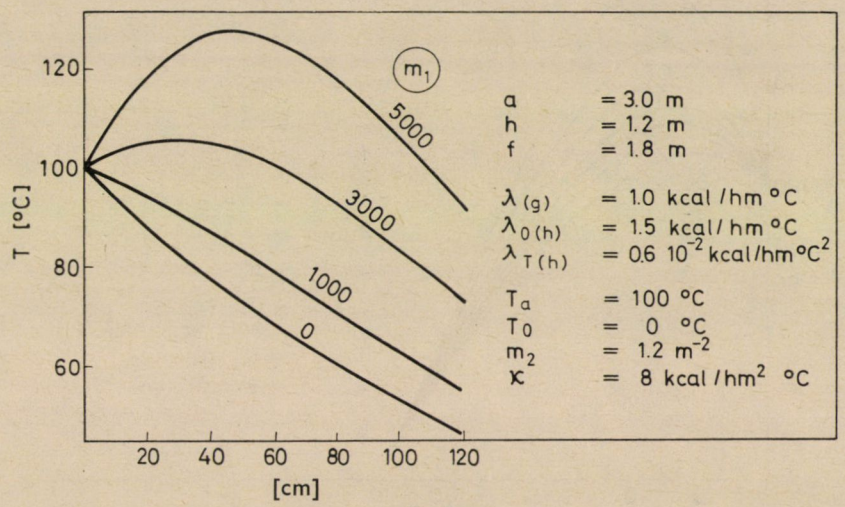
$$c_{1g} = \frac{\lambda_{0(g)}}{\lambda_{0(h)}} (C_{1h} - A^*_{T(a+h)})$$

$$c_{2g} = -\frac{\lambda_{0(g)}}{\lambda_{0(h)}} (C_{1h} - A^*_{T(a+h)}) \left[\ln (a+h+f) + \frac{\lambda_{0(g)}}{\varkappa} \frac{1}{a+h+f}\right].$$

7. Számítási eredmények

A levezetett összefüggések alapján, gépi úton összehasonlító számításokat végeztünk az egyes tényezők hatásának felmérése végett.

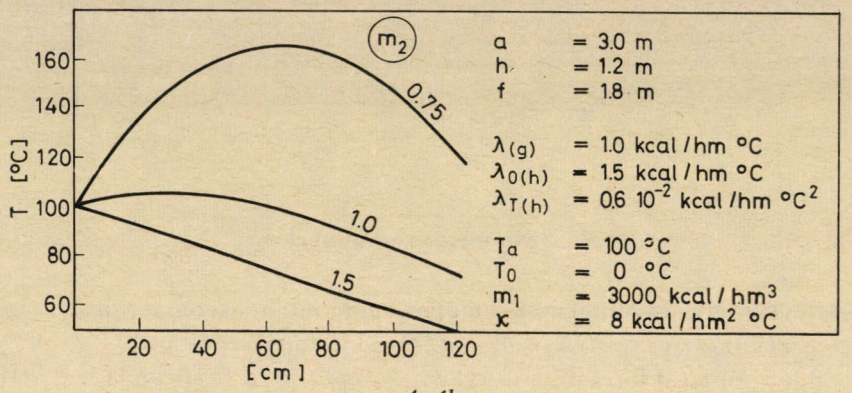
A 3. ábrán a (3) forrásfüggvényben szereplő m_1, a 4. ábrán m_2 együttható értékének megváltozásából adódó következményeket szemléltetjük.



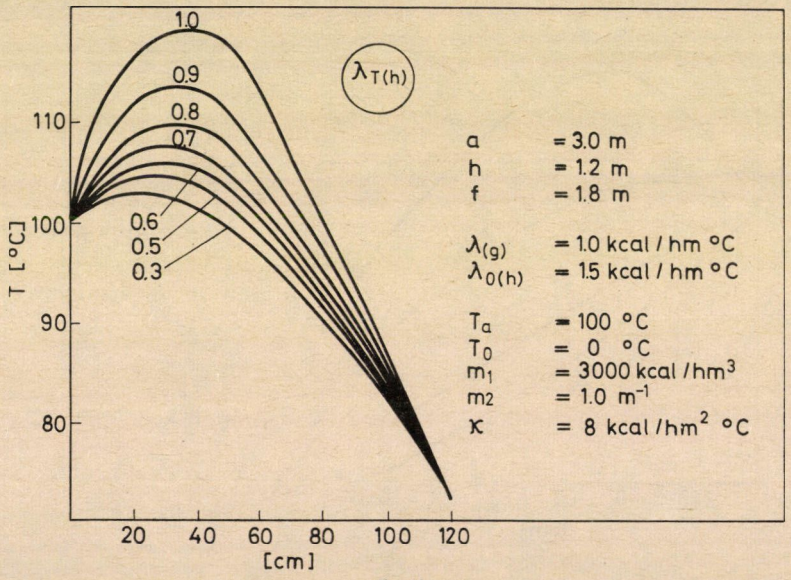
3. ábra

Az 5. ábra a beton hőérzékenységének, vagyis a $\lambda_{T(h)}$ számnak a hatását jellemzi. Ezzel kapcsolatban megjegyezzük, hogy a gyakorlati viszonyok között a homok hővezetőképességének befolyása a betonban kialakuló hőmérsékleteloszlásra csekély.

A 6. ábrán a betonhéj méretének hatását mutatjuk be, változatlan tartályfal-vastagság mellett. A szerkezeti betonréteg elvékonyításával az abban fellépő hőmérséklet-különbség is csökken, hiszen a termikus grádiens nagyobb része a homokban alakul ki. Meglepő jelenségnek tűnik ezzel szemben a belső hőforrásokra jellemző hőmérsékleti csúcs fokozatos leépülése.

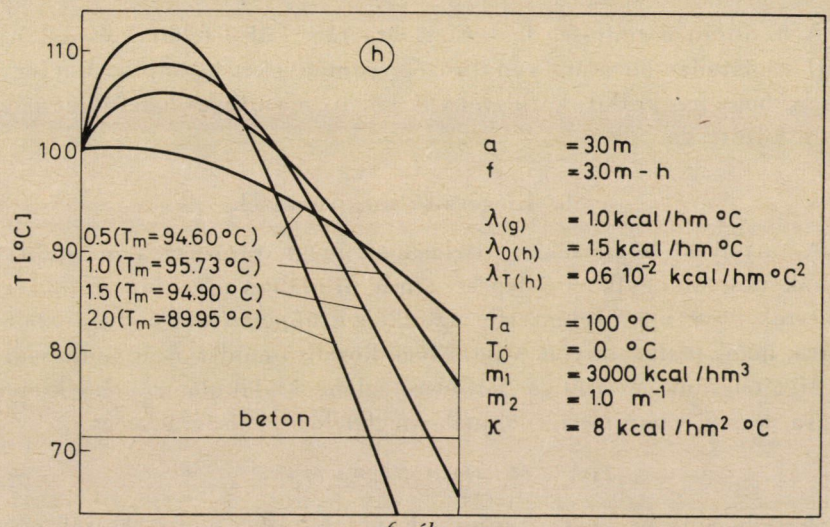


4. ábra

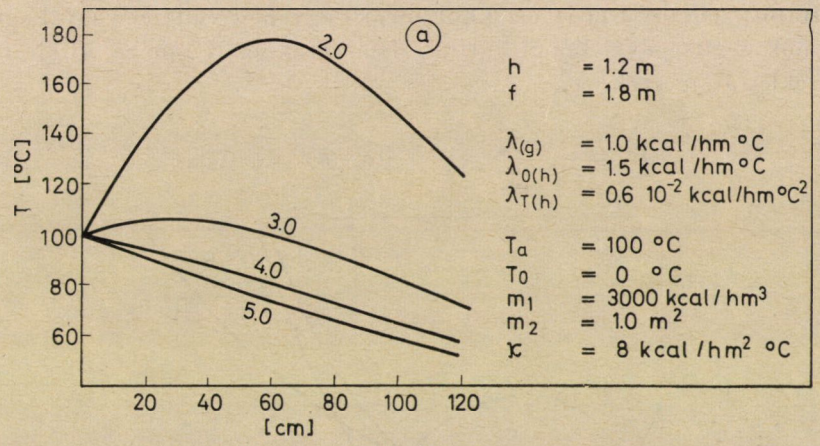


5. ábra

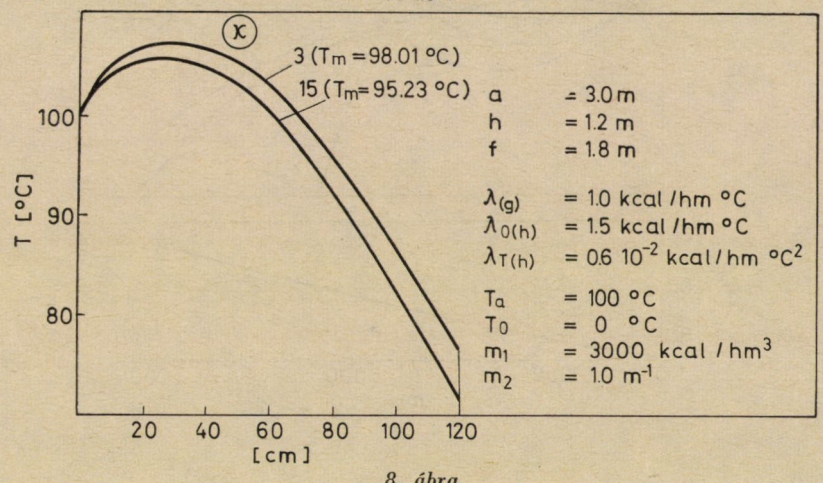
Ugyancsak a geometriai viszonyokat jellemzi a 7. ábra, ahol paraméterül a hengeralakú tartály belső sugarát, vagyis a fal görbültségét választottuk. Számításaink szerint a szerkezet „kiegyenesedésével" a hőmérsékleti csúcs rohamosan csökken.



6. ábra



7. ábra



8. ábra

A 8. ábrán a teljesség kedvéért a tartály külső felülete és a környezet közötti $\varkappa$ hőátadás hatására vonatkozó eredményeket közöljük. Megjegyezzük azonban, hogy gyakorlati körülmények között a változás lehetősége igen szűk határok között van.

8. Kiegészítő megjegyzések

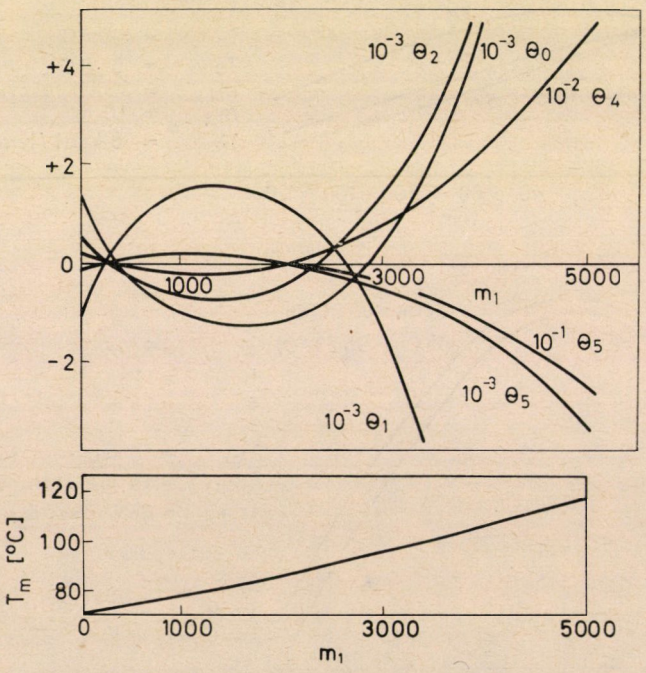
A tartályfal hőmérsékleteloszlásának meghatározása a mérnöki számításoknak csupán egyik első lépése, amit általában további, például erőtani vizsgálatok követnek. Tekintettel azonban a hőmérsékletfüggvény bonyolult alakjára, indokoltnak tartjuk valamilyen közelítő módszer alkalmazását.

Megítélésünk szerint a beton-rétegben kialakuló hőmérsékleteloszlás leírására, a gépi számítás igényeinek megfelelően, célszerűen egy

$$T(r) = \Theta_0 + \Theta_1 r + \Theta_2 r^2 + \Theta_3 r^3 + \dots \tag{14}$$

alakú hatványsort kell választanunk. Együtthatóit a pontos összefüggés által szolgáltatott néhány ismert értékből lineáris egyenletrendszer vagy Lagrange-polinomok segítségével számíthatjuk. Ismeretükben könnyen kifejezhető a hőmérséklet átlagértéke is:

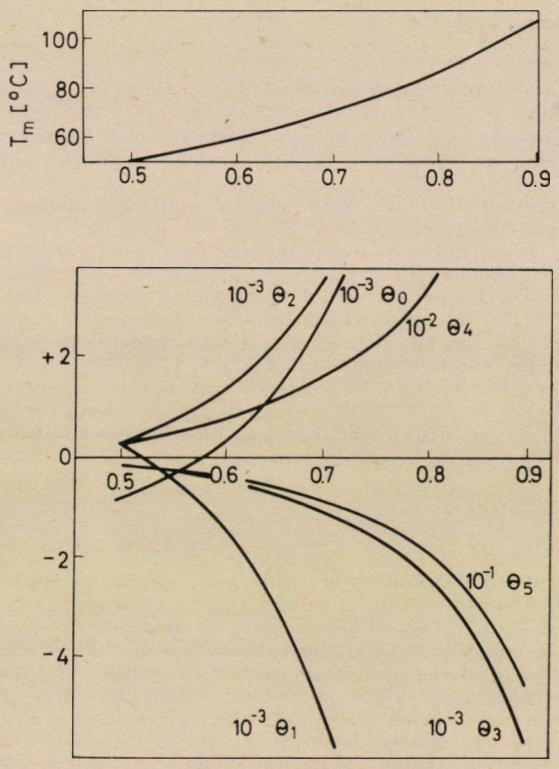
$$T_m = \frac{1}{h} \sum_{i=0,1\dots} \frac{\Theta_i}{i+1} [(a+h)^{i+1} - a^{i+1}]. \tag{15}$$



9. ábra

Példaként a különféle m_1 hőforrás-intenzitásokat jellemző 3. ábra görbéit ötödfokú polinommal közelítő összefüggések együtthatóinak változását a 9. ábrán közöljük. Ugyanitt adjuk meg a hozzá tartozó átlaghőmérséklet (T_m) értékét.

Igen hasonló lefutású Θ görbékre jutunk az 5. ábrán bemutatott, különféle hőérzékenységű betonokban kialakuló hőmérsékleteloszlásokat közelítő, ötödfokú összefüggés együtthatóinak feldolgozásakor is. A megfelelő értékeket a 10. ábrán szemléltetjük.



10. ábra

IRODALOM

1. BONILLA, C. F.: Nuclear Engineering, New York, McGraw Hill, 1957.
2. HALLIDAY, D. B.: Heat Release in Concrete Reactor Shields. *AERE R/R*, Harwell 1963.
3. SEBŐK, F.: Beitrag zur Berechnung kreiszylindrischer Behälter unter Einwirkung von Gamma- und Neutronenstrahlung. *Bautechnik* (1965).
4. SEBŐK, F.—TASSI, G.: Auswirkungen der Vorspannung auf die Rissbeschränkung bei thermisch beanspruchten dickwandigen Gefässen. *6. FIP Kongress*, Prag 1970.
5. CARSLAW, H. S.—JAEGER, J. C.: Conduction of Heat in Solids. Clarendon, Oxford. 1959.
6. THORNE, C. P.: Concrete Properties Relevant to Reactor Shield Behaviour, *ACI Journal*, (1961).
7. NYEKRASZOV, K. D.: Zsaroupornüj beton. Moszkva, Promsztrojizdat, 1957.
8. HAMPE, B.: Temperaturschäden im Beton. W. Ernst, Berlin 1942.
9. GRAF, O.: Die Temperaturleitfähigkeit von feuchten und trockenen Beton. *DAfE.* W. Ernst, Berlin, 1933.
10. WILSON, R.—MARTIN, F.: Water Retained in Hardened Cement Pastes. *ACI Proc.* (1935), 272—279.
11. PETERSON, E. G.: Shielding Properties of Ordinary Concrete as a Function of Temperatures. HW-65572, 1960.
12. DESZOV, A E.: Tazsolüe i gidratnüe betonü. Goszsztrojizdat, Moszkva, 1956.
13. CAMPBELL—ALLEN, D.—THORNE, C. P.: The Thermal Conductivity of Concrete. *Magazine of Concrete Research* (1963).
14. SEBŐK, F.: Über den Einfluß des Wassergehaltes auf die Strahlenschwächung in Betonabschirmungen. *Kerntechnik* (1965).
15. BROWNE, R. D.: Properties of Concrete in Reactor Vessels. *Conf. on Prestressed Concrete Pressure Vessels*, London 1968.
16. HIRSCHFELD, K.: Die Temperaturverteilung im Beton. Springer, Berlin 1948.
17. KOMAROVSZKIJ, A. N.: Sztroityelsztvo jadernüh usztanovok. Moszkva, *Atomizdat* (1965).
18. KRISCHER, O.: Der Einfluss von Feuchtigkeit, Körnung und Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit körniger Stoffe. Oldenbourg, München 1934.
19. SEBŐK, F.: A hőátadási viszonyok hatása tartószerkezetek termikus feszültségeire. *Mélyép. Szemle*, 1969.
20. CAMMERER, J. S.: Die konstruktiven Grundlagen des Wärme- und Kälteschutzes im Wohn- und Industriebau. Springer, Berlin 1936.

Investigation of the Distribution of Temperature within the Ribbed Wall of a Reactor-Vessel of New Type. The distribution of temperature in a multi-layer wall of a reactor-vessel of new type, treated in the paper, is associated with two new features compared with the usual problems. These are: *a)* active thermal sources inside the wall that may be described as a sum of exponential functions: *b)* the temperature-dependence of the coefficient of thermal conductivity of the concrete revealing itself of this latter through drying. By taking these special features into account, the calculation may be carried out in a closed form on the basis of the boundary conditions consistent with the actual environmental conditions, by the soluuion of the Fourier's equation written down in the cylindrical system of coordinates. By making tse of the derived relationship, calculations carried out on an electronic computer enables us to estimate the effect of each of the factors.

Untersuchung der Temperaturverteilung in der gerippten Behälterwand eines Reaktorbehälters neuesten Systems. Die in der Abhandlung behandelte Temperaturverteilung in der mehrschichtigen Wand eines Reaktorbehälters neuesten Systems, enthält im Vergleich zu den üblichen Aufgaben zwei neue Merkmale, und zwar: *a)* die im Innern der Behälterwand befindlichen Wärmequellen, die als die Summe von exponentiellen Funktionen aufgeschrieben werden können; *b)* die Temperaturabhängigkeit des Wärmeleitungskoeffizienten des Betons, die durch die Trocknung zum Ausdruck kommt. Unter Berücksichtigung der erwähnten Merkmale, kann die Berechnung durch Lösung der in Zylinderkoordinaten aufgeschriebenen Fourier-Gleichung aufgrund der den tatsächlichen Umgebungsverhältnissen entsprechenden Randbedingungen in geschlossener Form durchgeführt werden. Unter Verwendung des abgeleiteten Zusammenhanges ermöglichen mit einer Rechenanlage durchgeführten Berechnungen die Abschätzung der Auswirkungen der einzelnen Faktoren.

A VANÁDIUMTARTALOM RÉSZLEGES OLDÓDÁSÁNAK OKAI A MAGYAR BAUXITOK BAYER-ELJÁRÁS SZERINTI FELDOLGOZÁSAKOR

ZÁMBÓ JÁNOS*
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

és

MOLNÁR LAJOS**

Magyarországon a vanádium egyetlen ipari nyersanyagforrása a bauxit. A Bayer-eljárás szerinti feldolgozáskor azonban a bauxitok vanádiumtartalmának csak 1/3÷1/4-e nyerhető ki, a többi a vörösiszappal elvész. A részleges oldódás okai a vanádiumásvány megjelenési formájában keresendők, azonban a közvetlen ásványos meghatározáshoz szükséges mértékben a vanádium bauxitokból nem dúsítható. Irodalmi közlések alapján a szerzők sorra veszik a vanádium megjelenési formáit a természetben és mérlegelik ezek előfordulásának lehetőségét a bauxitokra vonatkozóan. A kísérleti részben vizsgálják a bauxit komponenseinek és vanádiumtartalmának kapcsolatát, majd az oldódás növelésének lehetőségeit. A vizsgálati eredmények alapján a geokémiai ismeretekkel összhangban megállapítják, hogy a magyar bauxitok esetében a vanádiumtartalom jelentős része a vasásványok (elsősorban goethit) izoform szennyezőjeként található és így a szokásos üzemi körülmények között nem tárodik fel. Az oldódás növelése csak a goethitszerkezet termikus vagy hidrotermális megbontása, illetve fellazítása útján várható.

Bevezetés

A hazánkban található primer vanádiumhordozók közül jelenleg csak a bauxitot lehet ipari méretű vanádiumsó termelésére alkalmas nyersanyagnak tekinteni [1]. A magyar bauxitok, a származási helytől függően, kismértékben változóan, általában 0,10÷0,14% V_2O_5-t tartalmaznak.

A Bayer-rendszerű timföldgyártás során a feltáráskor a bauxit V_2O_5-tartalmának mintegy egyharmada, egynegyede oldódik és a körfolyamatban levő aluminátoldatban feldúsul. A vanádiumtartalom nagyobb része a vörösiszapban marad és így a vanádiumhasznosítás szempontjából elvész. A timföldgyári körfolyamatból az oldott vanádium 80÷85%-át lehet kinyerni kristályos sókeverék formájában, amely a V_2O_5-előállítás nyersanyagául szolgál.

Az oldódás mértéke minden bizonnyal a vanádium ásványos megjelenési formájától függ a bauxitban, ezért vizsgálataink ennek megállapítására irányultak. A fázisanalízis nehézségeit a viszonylag kis mennyiség mellett az okozza, hogy a vanádium a bauxitokból a közvetlen ásványos meghatározáshoz szükséges mértékben nem dúsítható.

* Dr. Zámbó János, Budapest XI., Fehérvári út 146. .
** Molnár Lajos, Budapest XI., Török Ignác u. 32.

Ezért első megközelítésben sorra vesszük a vanádium lehetséges megjelenési formáit a természetben, majd az üledékes kőzetek ritkaelem tartalmára vonatkozó ismeretek alapján mérlegeljük az adott forma előfordulásának lehetőségét, illetve valószínűségét.

1. A vanádium megjelenési formái

A vanádium, mint a periódusos rendszer átmeneti eleme, a kristályszerkezetekben sajátságos viselkedésű. Koordinációs száma és konfigurációja más atomokkal az oxidációs foktól és a közeg pH-jától erősen függően változik.

A vanádium a magmában kisebb mennyiségben gyakran jelen van, önálló ásványokat azonban meglehetősen ritkán képez. Itt főleg háromvegyértékű formában található és mivel a V^{3+}-ion rádiusza (0,61 Å) majdnem azonos az Fe^{3+}-mal (0,67 Å), a vanádium az ásványképzésnél hajlamos a vasat követni. Így a vanádium kisebb mennyiségben megtalálható a magnetitben, piroxénben, amfibolban, biotitban.

11. A vanádium megjelenési formái a földkéregben

A vanádium geokémiailag négy különböző képződményben koncentrálódhat és mindegyikben eltérő kristálykémiai viselkedést tanúsít.[2] Ezek a következők:

111. szulfidok
112. oxidált szulfidos ércek
113. szilikátok
114. oxidok

111. Szulfidok

Két vanádiumszulfid-ásvány ismeretes: a szulvanit $Cu_3^{[4]}V_4^{[4]}S_4$ és patronit $V^{[8]}S_4$. A vanádium megtalálható a szfaleritben, a colusitban $Cu_3^{[4]}$ (As, Sn, V, Fe)$^{[4]}S_4$, valamint egy szintetikus spinelltípusú vegyületet is képez: CuV_2S_4.

112. Oxidált szulfidos ércek

Néhol másodlagos vanadátásványok csoportja jelenik meg a réz-, ólom-, cink-ércek feletti oxidált zónában, melyek formai hasonlóságot mutatnak a foszfátokkal és arzenátokkal, de szerkezeti azonosság csak két esetben mutatható ki. A vanádium az összes ilyen ásványban ötértékű.

Ez ideig a következő ásványok szerkezetét vizsgálták:

descloizit $Pb^{[8]}$ $(Zn, Cu)^{[6]}V^{[4]}$ $[O_4]$ (OH), azonos szerkezetű a conichalcittal $CaCu[AsO_4]$ (OH),

pirobelonit $Pb^{[7]}$ $Mn^{[6]}$ $[V^{[4]}O_4]$ (OH),

brakebuschit $Pb^{[8]}$ $Pb^{[10]}$ $(Mn, Fe)^{[6]}$ $[V^{[4]}O_4]_2$ H_2O,

bucherit $Bi^{[8]}$ $[V^{[4]}O_4]$,

vanadinit $Pb_2^{[9]}$ $Pb_3^{[8]}$ $[V^{[4]}O_4]_3$ Cl, ennek szerkezete azonos a klórapatit szerkezetével $Ca_5[PO_4]_3$ Cl.

113. Szilikátok

Nagy mennyiségű vanádium, mint helyettesítő elem létezik a muszkovit csillámban, a roscoelit ásványt képezve. A csillám oktaéder-rétegeiben a vanádium(III) némi vas(II)-vel az alumíniumot helyettesítve, a képződmények széles skáláját hozhatja létre. Egy tipikus colorádói roscoelit a következő képlettel jellemezhető:

$$(K_{0,75}Ca_{0,02})^{[12]}(V^{3+}_{1,16}Al_{0,72}Fe^{2+}_{0,09}Mg_{0,08})^{[6]}(Si_{3.18}Al_{0,82})^{[4]}O_{10}(OH)_{1,97}F_{0,03}$$

A roscoelit oxidációjakor és mállásakor vanádiumtartalmú montmorillonit és klorit típusú anyagok keletkeznek. A vanádium ezekben az ásványokban mindig négyértékű, oktaéderes rétegekben helyezkedik el. A további oxidációt a szilikátszerkezet felbomlása és az ötértékű vanádium megjelenése kíséri.

114. Oxidok

Néhány homokkő-rétegben főképpen a Colorado Fennsíkon a vanádium, mint oxid képződött, majd ezt követően széles körű ásványképződés mellett elmállott. Az eredeti képződmény főleg háromértékű oxidhidroxid, a montroseit $V^{[6]}O(OH)$, amely a goethithez FeO(OH) és groutithoz MnO(OH) hasonlóan diaszpor-szerkezetű. Ilyen oxidációs foknál a vanádium az oxigénnel általában normál oktaéderes koordinációjú és kristálykémiai viselkedésében hasonlít a vas(III)-hoz és a mangán(III)-hoz. A vas a montroseitben rendszerint jelen van szilárd oldat formájában. A vanádium sok szintetikus spinelltípusú oxidot képez, mint $V^{3+}Mg_2O_4$, $V^{3+}ZnO_4$, $V_2^{+}MgO$ és $V_2^{+}ZnO_4$.

A nonalit telérásvány $Fe_{2,5}V^{3}_{1,5}$ $V^{4+}_{6}O_{16}$ hexagonális szerkezetű, közeli az olyan spinellhez, amelyben a vanádium mind oktaéderes, mind tetraéderes koordinációjú.

Az oktaéderes oxid-hidroxid-szerkezet tartalmazhat négyértékű vanádiumot is, változtatva az oktaéder kapcsolatát, mint a häggitben $^{2}_{\infty}V^{[6]}_{2}O_2(OH)_3$ (átlagos oxidszám 3,5) és egy névtelen „B" ásványfázisban $^{2}_{\infty}V^{[6]}_{3}O_3(OH)_5$ (átl. oxidszám 3,67), vagy változtatva a hidrogéntartalmat, mint a paramontroseitben $V^{[6]}O_2$ és doloreseitben $V^{4+}_{3}{}^{[6]}O_4(OH)_4$. A paramontroseit a montroseit

szilárd fázisban végbemenő oxidációs termékének tekinthető (a hidrogénvesztéskor megőrzi általános szerkezetét). Ez feltehetően metastabil a szintetikus VO_2-höz viszonyítva, amely a rutilhoz hasonló szerkezetű. A doloreseit a névtelen „B" fázishoz hasonló. Mindezekben a szerkezetekben a dupla oktaéderláncú diaszporszerkezet a domináló jellegzetesség.

Négy- és ötértékű állapotban a vanádium rendszerint még megőrzi a megközelítően oktaéderes koordinációt az oxigénnel, a konfiguráció azonban súlyosan eltorzul egy-két többszörös vegyi kötés létrejötte miatt, de a négyzetes piramis konfiguráció is nagyon gyakori.

A montroseit oxidációjakor és mállásakor a következő alternatív sorrend lehetséges:

$$\text{montroseit } VO(OH) \longrightarrow \text{doloreseit} \longrightarrow V_3O_4(OH)_4$$

$$\longrightarrow \text{duttonit } VO(OH)_2 \longrightarrow \text{corvusit } V_3O_{13}(OH)_3\,XH_2O(?) \longrightarrow$$

$$\longrightarrow \text{hewettit } CaV_6O_{16}\,XH_2O$$

A teljesen ötértékű oxidált vanádium jobban oldhatóvá válik és a szerkezet további lényeges változásai már a közeg pH-jától függnek. Ha a talajvíz vanádiumtartalma megnő, 2,5÷6-os pH-tartományban narancssárga sókiválás észlelhető, izopolikomplex dekavanadát-ion képződik ($V_{10}O_{28}^{6-}$), melyet a pascoit $Ca^{[6]}\,Ca_2^{[7]}[V_{10}^{[6]}O_{28}]\,17H_2O$ és a huemulit $Na_4Mg[V_{10}^{[6]}O_{28}]24H_2O$ ásványok képviselnek.

Számos átmeneti elem az 5. és 6. csoportból (V, Ta, Nb, Mo, W) képez nagy polinukleáris iont, de ez ideig csak a dekavanadátot találták meg a természetben. A dekavanadátion szerkezete nagyon sajátságos, tíz VO_6^- oktaédert tartalmaz. Amint az ilyen komplexoldat savassága csökken (pl. kalcitos homokkőrétegen halad keresztül), a dekavanadát-komplex felbomlik kisebb ismeretlen szerkezetű poliionná és színtelen rossit $_{\infty}^{1}Ca^{[8]}[V^{[5]}O_3]_2\;4H_2O$, metarossit $_{\infty}^{1}Ca^{[8]}[V^{[5]}O_3]_2\;2H_2O$ és $K^{[10]}[V^{[5]}O_3]H_2O$ kristály képződhetik.

11-es pH-nál lúgosabb közegben, bár ez a természetben nem fordul elő, a foszfáthoz és arzenáthoz hasonló mononukleáris ionok $[HVO_4]^{2-}$ és $[VO^4]^{3-}$ képződnek.

12. A vanádium valószínűsíthető megjelenési formái a bauxitokban

A bauxitokban önálló vanádiumásvány jelenlétére utaló irodalmi közleményt nem találtunk, Bárdossy György személyes közlése alapján azonban értesültünk arról, hogy az ausztriai unterlaussai bauxitból sikerült kiválasztania és azonosítania metatujamunitot.

A. I. Hammer munkái alapján [3], aki a vanádium előfordulását vizsgálta agyagokban és Terentyeva nyomán, aki a ritkaelemeket tanulmányozta

a bauxitokban [4], valamint a bauxit vanádiumtartalmára vonatkozó közlemények szerint a vanádium a következő formákban lehet a bauxitokban:

121. Izomorf szennyezőként a bauxit fő ásványos alkotóiban

A fő alkotók és a vanádiumtartalom közötti kapcsolatot vizsgálva, BENESZLAVSZKIJ [5] a tatár és szofievszki bauxitok nagy vastartalmú oolitjaiban a bauxit alapanyagához viszonyítva 2÷2,5-szeres, az északuráli bauxitok piritfrakciójában pedig az átlaghoz viszonyított 3÷5-szörös vanádiumdúsulást talált.

TENJAKOV [6] különböző eredetű bauxitokban a vanádium- és vastartalom között meglehetősen szoros összefüggést mutatott ki, a V/Fe viszony átlagértékét $2{,}8 \cdot 10^{-3}$-nak találta.

Ifj. DUDICH és SIKLÓSINÉ [7] különböző magyar bauxitelőfordulásoknál kapcsolatot talált az Fe_2O_3- és V_2O_5-tartalom között (a korrelációs koefficiens +0,9 körüli). A TiO_2/V_2O_5 komponensek között Gánt, Halimba esetében nagyon szoros (+0,927), Fenyőfő, Iszka térségéből származó bauxitra pedig nem volt kimutatható összefüggés (—909, —0,996). Az Al_2O_3/V_2O_5 között a korrelációs vizsgálatok szabályszerűségre nem mutattak, az $Fe_2O_3+Al_2O_3/V_2O_5$ összefüggés azonban, főleg egyes telepeken belül, függőleges eloszlási vizsgálatoknál észlelhető.

A magyar bauxitok nagyobb mennyiségben jelenlevő ásványkomponense a kaolinit is, melynek lehetséges vanádiumtartalmára közvetlen irodalmi utalást nem találtunk.

122. A bauxit kísérő ásványaiban, mint szennyező

A bauxitban kisebb mennyiségben jelenlevő ásványok közül számos tartalmazhat vanádiumot. Így a bauxitban gyakran található elsődleges (magmás) kőzetek maradványaiból álló finom kristálytörmelék, mint a rutil, anatáz, titanit, ilmenit, vagy különböző agyagásványok és bomlástermékek, mint muskovit, turmalin, disztén, gránát, apatit, cirkon, klorit stb. [8]. Ezek mennyisége azonban a magyar bauxitokban nagyon kicsiny.

123. Másodlagos vanadátkicsapódás eredményeként

A bauxitosodás során oldatba került vanádium a pH-tól függően különböző összetételű anionokat képezett. H. IVEKOVIC szerint [9] hypergenetikus folyamat következtében a talaj savas közege a vanadátiont vanadil (VO_2^{2+})-ionná alakította, amely az atmoszféra oxigénjével ismét $H_2VO_4^-$-ionná változott. Ez utóbbi 2÷6,8 pH között $H_3V_5O_{16}^{4-}$-é polimerizálódott, ami savas

közegben az Fe^{3+}-ionnal lassan reagálva, sókat képez. IVEKOVIC ezzel magyarázza a Drnis-i bauxitoknál a vasoxid- és a vanádiumtartalom között észlelt lineáris összefüggést. V. TENJAKOV később megjelent munkájában [6] hasonló következtetésre jutott más bauxitok esetében is.

124. Adszorbeált formában

Az üledékes kőzet alkotóinak felületén szintén adszorbeálódhatnak a ritkaelemek ionjai. A bauxit és fő alkotóinak felületi aktivitása közismert (aktív bauxit, aktív timföld stb.).

HAMMER kimutatta, hogy a bauxitok agyagásványai, de még inkább az oxidhidrátjai jelentős mennyiségű vanádiumot képesek adszorbeálni vanadát-ion-tartalmú oldatokból. Véleménye szerint a vanádium viszonylag nagy mennyisége a magnetitben és a ferrotitánércekben a vanádium izomorf beépülésével, az üledékes vasércekben pedig az adszorbciós képességgel magyarázható.

125. Komplex szerves vegyületekben

Egyes ritkaelemek gyakran találhatók az üledékes kőzetekben komplex szerves vegyületek alkotóiként. Ismeretes, hogy a vanádium sokszor fellelhető növényi és állati eredetű szerves anyagokban (kőolaj, egyes élőlények vérében stb.) Megfigyelték, hogy a vanádium rendkívül könnyen kötődik, elnyelődik szerves anyagokon.

GEDEON T. szerint [10] ezek a vanádiumtartalmú szerves vegyületek a porfirinek csoportjába tartoznak (C, H, O, N tartalmúak). A vegyületek nagyon stabilak, bomláspontjuk 150÷400 °C közé esik, általában lúg- és savállóak és csak igen erős oxidálószerek roncsolják őket. Kísérletei szerint a bauxit súlyára számított 2÷3% $K_2S_2O_8$ (esetleg Na_2O_2) a vörösiszap szokásos 0,16% V_2O_5-tartalmát 0,06%-ra csökkentette. BOGÁRDI E. [11] Na_2O_2-dal végzett kísérleteinél is tapasztalt vanádiumoldódás- növekedést.

13. A vanádium vegyértéke és lúgoldhatósága

A vanádium 2, 3, 4, 5 és 7 vegyértékű lehet. A természetben általában az 5 értékű vanádium a legstabilabb. Az 5 értékű vanádium kimondottan savas karakterű, a 4 értékű amfoter tulajdonságú, bár a bázikus jelleg kifejezettebb, az alacsonyabb vegyértékűek pedig bázikusak. Így feltehető, hogy a bauxitnak csak az 5 értékű vagy az előzetesen ötértékűvé oxidálódott vanádiumtartalma kerül a feltáráskor az aluminátlúgba [11].

Számos laboratóriumi vizsgálat és üzemi anyagmérleg mutatja, hogy a magyar bauxitok esetében a V-oldódás értéke a származási helytől függően viszonylag szűk határok között változik [12, 13].

A lúgoldhatóság szempontjából a lehetséges V-megjelenési formákat három csoportba sorolhatjuk:

A vanádiumtartalomnak az a része, amely a jelenlegi technológiai viszonyoknál is oldatba megy, magában foglalja a bauxit alumínium- és agyagásványaiba esetlegesen beépült izomorf vanádiumot, valamint a lúgban oldható vanádiumvegyületeket.

A másik csoportba a vanádiumtartalomnak az a része tartozik, amely pörkölés vagy erős oxidálószerek hatására elbomlik, vagy roncsolás, fellazulás következtében az oldólúg számára hozzáférhető lesz.

A harmadik rész sem a bauxit kezelésével, sem pedig a lúgos feltárás lehetséges módosításával nem vihető oldatba.

A fenti megfontolások figyelembevételével a bauxitok és vörösiszapjaik néhány speciálisan megválasztott savas, lúgos és kombinált kezelésével a lehetőségek tovább szűkíthetők, ezért vizsgálatainkat a V egyes megjelenési formáinak a kimutatása, illetve valószínűsítése céljából végeztük.

2. A V-tartalom eloszlása a bauxitokban

Az egyes bauxittelepeknél észlelt korrelációs összefüggések további vizsgálatára kiválasztottunk két Kincses II-ből származó tarka bauxitot, amelyet szín szerint világos és sötét részre különítettünk el. A bauxitok és az egyes frakciók elemzési adatait az I. táblázatban tüntettük fel.

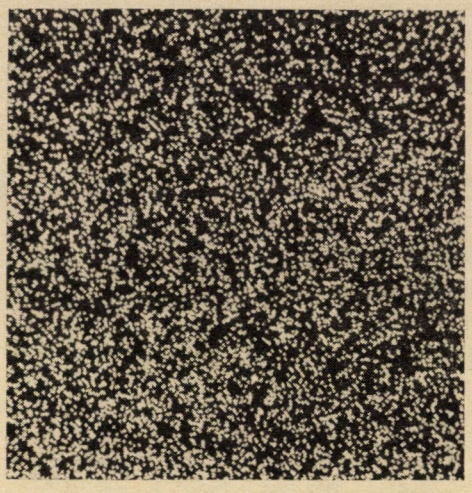
I. táblázat

Tarka bauxitok és szín szerint szétválasztott részeinek elemzési adatai, %

Megnevezés	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	V_2O_5	SO_3	Izz. v.
1. Tarka bauxit Kincses II.	52,3	8,0	12,1	3,0	0,7	0,5	0,142	0,24	20,9
2. Tarka bauxit világos rész	58,7	8,7	6,0	3,3	0,7	0,5	0,092	0,19	22,0
2. Tarka bauxit sötét rész	50,5	7,2	14,3	2,9	0,7	0,4	0.126	0,26	20,0
4. Tarka bauxit Kincses II.	53,2	7,8	11,6	2,7	0,7	0,5	0,121	0,29	21,5
5. Tarka bauxit világos rész	57,6	8,0	7,1	3,1	0,7	0,3	0,083	0,24	22,2
6. Tarka bauxit sötét rész	46,9	6,5	18,0	2,8	0,7	0,3	0,168	0,22	20,2

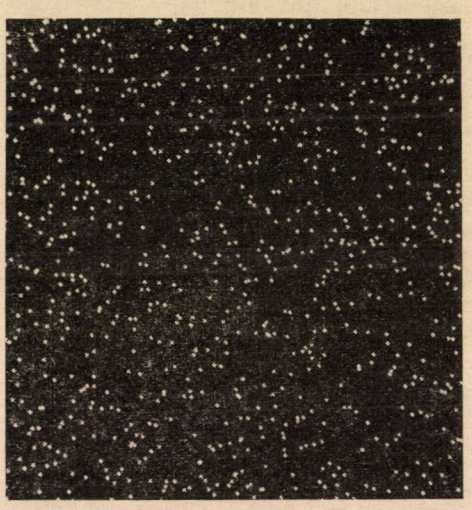
Az elemzési adatokból kitűnik, hogy a vizsgált bauxitokban a vas- és vanádiumtartalom kapcsolata a tarka bauxitok 1÷2 cm-es foltjaiban is egyértelműen kimutatható.

Annak eldöntésére, hogy a kapcsolat mikroméretekben is érvényesül-e, megkíséreltük a vanádiumeloszlás elektronmikroszondás vizsgálatát, bár a

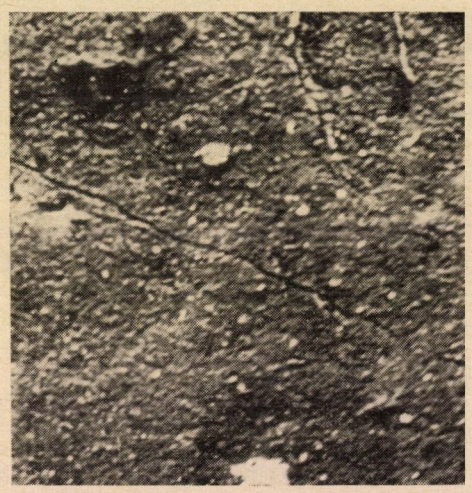


1. *ábra.* Almásfüzitői üzemi bauxit Fe eloszlási képe

2. *ábra.* Almásfüzitői üzemi bauxit Ti eloszlási képe



3. *ábra.* Almásfüzitői üzemi bauxit V eloszlási képe



4. *ábra* Almásfüzitői üzemi bauxit visszavert elektronképe

röntgenreflexiók fizikai adottságai miatt nagy mennyiségű Ti mellett a V nem határozható meg.

A vizsgálatokat Vassel K. Róbert és munkatársai végezték egy JEOL—JXA-5 típusú elektronmikroszondával.

Az 1., 2. és 3. ábrán az Almásfüzitői Timföldgyárból származó bauxitról 400×-os tényleges nagyítással készült Fe—Kα, Ti—Kα és V—Kα röntgenreflexiók területi eloszlása látható. A katódsugárcsövön a letapogatás során felvillanó

5. ábra. Almásfüzitői tarka bauxit visszavert elektronképe

6. ábra. Bagolyhegyi lignites bauxit visszavert elektronképe

fényes pontok, illetve a pontokból felépített kép az illető elem eloszlását mutatja. Amíg a vas eloszlási képén helyi dúsulások és ritkulások láthatók és az egyenletesnek tűnő Ti-eloszlás mellett önálló Ti-ásványra utaló helyi dúsulások észlelhetők, addig a V-eloszlás az adott nagyításnál nem mutat ásványképződésre utaló helyi dúsulást, azonban bizonyos szabályszerűség, vonalas elrendeződés tapasztalható. A minta más részein sokkal jelentősebb Fe- és Ti-dúsulás található, e részecskék környékén azonban a V-vizsgálata nem végezhető el.

A 4. ábrán az említett almásfüzítői bauxitról, az 5. ábrán a megvizsgált tarka bauxitról, míg a 6. ábrán egy vasban szegény, szerves anyagban dús, lignites bauxitról készült, visszavert elektronképet mutatunk be. A képet a minta felületét letapogató elektronsugár-nyalábból a különböző elektronvisszaverő tulajdonságú fázisokról visszavert elektronok adják. A nehezebb átlagatomsúlyú területek, azaz a nagyobb elektronvisszaverő képességű fázisok a képen fényesebbek, mint a könnyű elemekben gazdagok. Mindhárom felvétel 20 kV gyorsítófeszültséggel készült, a tényleges nagyítás 430×-os.

Az előbbiekben makroszkopikusan szétválasztott tarka bauxitmintán mikroszkopikusan is megkíséreltük a megkülönböztetést, azonban a nagyítás miatt az elektronmikroszondában ez nem volt olyan élesen elvégezhető. Az 5. ábrán a „világos" mező felel meg a „vörös" részletnek, míg a sötétebb erek a „sárga" részeknek.

A bemutatott felvételek környékén az elemeloszlási képek, a beütési számok mérése alapján vizsgáltuk az Al-, Fe-, Si-, Ti- és V-koncentrációk relatív változását, illetve arányát. A beütési számok a II. táblázatban láthatók.

II. táblázat

Néhány bauxit visszavert elektronképén mért beütési számok

	Al	Fe	Si	Ti	V
1. A. füzitői üzemi bauxit	46 000	10 000	6 000	500	100
2. Tarka bauxit „vörös" rész	42 000	10 000	13 000	350	90
3. Tarka bauxit „sárga" rész	52 000	2 000	13 000	350	50
4. Lignites bauxit	40 000	800	16 000	300	50

A vizsgálatokat más körülmények között, az előbbiekhez közeli, de nem azonos mérési helyeken megismételve, hasonló beütési számokat kaptunk.

A III. táblázat a beütési számok alapján megállapított megközelítő fémkoncentrációkat mutatja.

III. táblázat

A beütési számok alapján meghatározott százalékos fémtartalom

	Al	Fe	Si	Ti	V
1. A. füzitői üzemi bauxit	27	7	3,5	0,6	0,1
2. Tarka bauxit „vörös" rész	25	7	7,5	0,4	0,09
3. Tarka bauxit „sárga" rész	30	1,5	7,5	0,4	0,05
4. Lignites bauxit	23	0,6	10	0,3	0,05

A vizsgált bauxitok elemzési adatait a IV. táblázat tartalmazza.

A mikroszondás vizsgálatok eredményéből látható, hogy a Fe—V-kapcsolat a vizsgált bauxitoknál mikroméretekben is kimutatható.

IV. táblázat

Különböző szervesanyag-tartalmú bauxitok elemzési adatai, %

Jelzés	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	V_2O_5	SO_3	C org.	Izz. v.
1. A.füzitői üzemi bauxit	49,0	7,0	18,0	2,6			0,09		0,062	20,3
2. Ajkai üzemi bauxit	47,9	6,4	23,1	2,6			0,110			19,6
3. Lignites bauxit Bagolyhegyi	36,2	12,6	2,3	2,5	2,4	0,8	0,091	0,46	9,42	43,1
4. Tarka bauxit Kincses II.	52,3	8,0	12,1	3,0	0,7	0,5	0,142	0,24	0,010	20,9
5. Tarka bauxit Kincses II.	53,2	7,8	11,6	2,7	0,7	0,5	0,121	0,29	0,011	21,5
6. Szürke bauxit Kincses II.	47,7	20,2	7,0	2,2	1,1	0,5	0,093	7,0	0,12	21,2
7. Lilás vasban dús bauxit Kincses II.	28,7	19,2	36,0	1,3			0,06		0,06	11,3

A Ti—V-kapcsolatra e vizsgálatokkal következtetni nem tudunk, mivel a Ti dúsulási helyeit elkerültük. Helyi V-dúsulás egyetlen mintában sem volt kimutatható, az eloszlás statisztikusan egyenletes. Jelentős C-koncentráció a várakozásnak megfelelően csak a 6. ábrán látható mintában volt homogén eloszlással, amit V-dúsulás nem kísért.

3. A vanádium és a bauxit egyéb alkotói kapcsolatának vizsgálata

31. A vanádium és a szerves anyag kapcsolata

Az eddigi korrelációs vizsgálatok a szervesanyag-tartalomra nem tértek ki, az irodalmi közlések alapján azonban ilyen kapcsolat feltételezhető, ezért további kísérletek elvégzését tartottuk szükségesnek.

Vizsgálatainkhoz különböző szervesanyag-tartalmú bauxitokat gyűjtöttünk.

A bauxitok elemzési adatait a IV. táblázatban közöljük. Bár az elemzési adatok szerint a vizsgált alkotók mennyisége között nincs összefüggés, technológiai kísérleteket végeztünk a két alkotó viselkedésének együttes tanulmányozása végett.

A bauxitokat szokásos körülmények között (240 °C, 2 óra, 200 g/liter Na_2O_k) feltártuk és megállapítottuk a vanádium megoszlását a vörösiszap és a lúg között. Az oldódási értékek a minták sorrendjében 27,6; 32,0; 55,0; 47,2; 47,8; 72,2 és 6,1% voltak.

A Fémipari Kutató Intézetben Fehér Iván részletesen vizsgálta a szerves anyag oldódását a bauxitok feltárásakor [14] és megállapította, hogy az almásfüzitői üzemi bauxitból a normál feltárási viszonyok mellett 60% szerves anyag oldódik, ami jelentősen meghaladja a vanádiumoldódás értékeit. A többi magyar bauxitra is hasonló értékek adódtak.

A bauxitot a szerves anyag elbontása érdekében különböző hőmérsékleten két-két órán át pörköltük. A nyers és pörkölt bauxitok összetételét az V. táblázat mutatja. Eszerint a szerves anyag a pörköléskor gyakorlatilag kiégethető.

V. táblázat

Az almásfüzitői Timföldgyárban feldolgozott bauxit összetétele nyers állapotban és különböző hőmérsékleten pörkölve, %

Megnevezés	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	V_2O_5	Izz. v.	C org.
Nyers bauxit	49,0	7,0	18,0	2,6	0,09	20,3	0,62
350 °C-on pörkölve	53,9	7,7	20,9	2,9	0,10	11,2	0,025
550 °C-on pörkölve	55,2	8,4	22,5	3,1	0,108	4,8	0,006
750 °C-on pörkölve	55,8	8,5	22,8	3,2	0.11	3,1	0,002

A nyers és pörkölt bauxitot azonos körülmények között feltártuk, a kapott aluminátlúgokban és vörösiszapokban mértük a szervesanyag- és vanádiumtartalmat. A mért és számított adatok szerint (VI. táblázat) a szervesanyag teljes kiégése esetén is jelentős mennyiségű vanádium marad vissza feltárulatlanul.

VI. táblázat

Adatok az almásfüzitői üzemi nyers és pörkölt bauxit feltárásakor a szervesanyag és V-tartalom oldódására

Megnevezés	szerves C		V_2O_5		
	lúgban g/l	iszapban %	lúgban g/l	iszapban %	kihozatal %
Nyers bauxit	0,043	0,033	0,028	0,084	25
350 °C-on pörkölt	0,020	0,010	0,044	0,064	39
550 °C-on pörkölt	nem mérhető		0,060	0,064	53,6
750 °C-on pörkölt	nem mérhető		0,078	0,042	69,8

A minták szervesanyag-tartalmának meghatározását az ELTE Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszéken MAROS L. és munkatársai végezték. Vizsgálataink alapján nem sikerült kapcsolatot találni a bauxitok szervesanyag- és vanádiumtartalma között, mert:

— nincs összefüggés a két alkotó mennyisége között a bauxitban;

— a feltáráskor a szerves anyag lényegesen nagyobb mértékben oldódik, mint a vanádium;

— a pörkölés hatására a szerves anyag gyorsabban bomlik, mint ahogyan növekszik a V_2O_5-oldódás.

Kísérleti eredményeink azonban nem zárják ki annak lehetőségét, hogy a vanádiumtartalom kisebb része szerves vegyületekhez kötődhetik.

32. *A bauxit V- és Ti-tartalmának kapcsolata*

Mivel a közvetlen fizikai és ásványos módszereket e kapcsolat felderítésére nem tudtuk alkalmazni, technológiai jellegű vizsgálatokkal próbálkoztunk.

HAZAINÉ és SOLYMÁR [15] megállapította, hogy feltáráskor a titánásványok részben reagálnak a nátronlúggal és nátriumtitanátot képeznek. A bauxit anatáz- és rutil-tartalmának reakciója a feltáró lúggal a feltárás hőmérsékletén és időtartamán kívül a feltárólúg koncentrációjától és molviszonyától függ. Ha a feltáráskor nagy molviszonyt biztosítunk, az anatáz- és rutiltartalom teljes egészében oldatfázison keresztül nátriumtitanáttá alakul, így az esetlegesen beépült V is a feltárólúg számára hozzáférhetővé lesz. Ezért azonos körülmények között (240 °C, 2 óra) almásfüzitői üzemi bauxittal megvizsgáltuk a lúgfelesleg hatását a vanádiumtartalom beoldódására. A kísérlet eredménye

VII. táblázat

Az almásfüzitői üzemi bauxit feltárásának adatai különböző bemérési molviszonynál (feltárólúg 150 ml)

Iszapelemzés, %

	Bemérés g	Iszap g	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	V_2O_5	Na_2O	Izz. v.	V – oldódás, %
1	5	1,7	13,8	9,6	48,0	6,8		8,4	9,7	
2	10	4.5	17,1	11.1	37,5	5,1	0,15	14,5	13,0	30.4
3	20	9.3	18,4	12,7	37,0	5,1	0,15	13,8	11,3	29.2
4	30	13,7	18,5	13,3	37,4	5,1	0,15	12,8	10,2	29,8
5	43	20.0	19,7	13,2	36,9	5.2	0,15	10,5	10,6	29,1
6	60	33,7	29,6	11,5	31,1	4,5	0,13	12,6	10,9	24,8

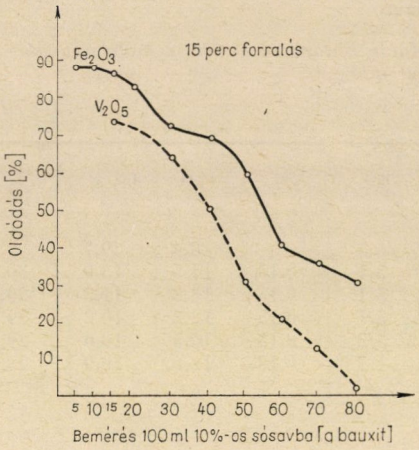
Lúgelemzés

	Na_2O, g/l	Al_2O_3, g/l	Molviszony	V_2O_5, g/l	V- oldódás, %
1	122,6	68,0	2,97	0,0095	42,4
2	128,1	73,0	2,89	0,0189	42,0
3	126,1	89,0	2,33	0,0336	37,5
4	121,6	105,5	1,95	0,049	36,5
5	117,6	129,0	1,49	0,060	31,7
6	110,6	138,0	1,31	0,074	27,6

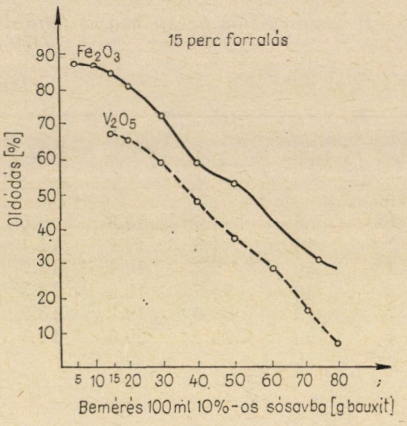
a VII. táblázat adataiból látható. Az *1*-jelű minta eredményei nem értékelhetőek, mivel a nem kielégítő kovasavtalanodás miatt oldatban maradt kovasav a kis bauxitbemérés miatt az eredményeket nagyon meghamisítja. A *2* és *3*-jelű minták átlagosnál magasabb nátrontartalma a nátriumtitanát-képződés teljes lejátszódására utal. Az eredmények azt mutatják, hogy a bauxit Ti-tartalmának teljes átalakulása esetén sem változik jelentősen a V-oldódás mértéke, ezért a V-tartalom jelentős része nem kapcsolódhat a Ti-ásványokhoz. A lúgelemzések alapján észlelhető kisebb növekedés az OH^--ionok nagyobb aktivitásának a következménye is lehet.

33. A Fe- és V-tartalom kapcsolatának vizsgálata

További vizsgálatainknál savas kezeléssel fokozatosan távolítottuk el a bauxit Fe-tartalmát a V-oldódás egyidejű meghatározásával. Különböző mennyiségű almásfüzitői és ajkai üzemi átlagbauxitot 100 ml 10%-os sósavoldatban 15 percig forralva kezeltünk. A 7. és 8. ábrán a feloldott Fe_2O_3 és V_2O_5 százalékos mennyiségeit tüntettük fel. Megfigyelhető, hogy savas kezeléskor csak a Fe-tartalom kb. egyharmadának oldódása után kezdődik meg a V-oldódása és mindkét bauxittípus esetén savval csak a V-tartalom kétharmad-



7. ábra. Almásfüzitői üzemi bauxit vasoxid- és vanádiumoxid tartalmának oldódása a sósavfelesleg függvényében



8. ábra. Ajkai üzemi bauxit vasoxid és vanádiumoxid- tartalmának oldódása a sósavfelesleg függvényében

háromnegyed része vihető oldatba. Ebből úgy tűnt, hogy lúgos feltárással és savas kezeléssel a teljes V-mennyiség kioldható, ezért a különböző savakkal kezelt bauxitokat aluminátlúgban a szokásos körülmények között feltártuk. A kapott eredményeket a VIII. táblázatban foglaltuk össze. Bár a lúgos feltáráskor az enyhén savazott bauxitnál 10, az erősen vastalanítottnál pedig mintegy 5%-kal nő a vanádiumoldódás, nagy vanádiumkihozatalt csak a vasoxidtartalom eltávolításával sikerült elérni.

VIII. táblázat

Savval kezelt, majd lúgban feltárt bauxitok iszapjainak Fe_2O_3 *és* V_2O_5*-tartalma,* %

Jelzés	Almásfüzítő		Ajka	
	Fe_2O_3	V_2O_5	Fe_2O_3	V_2O_5
1	28,0	0,123	34,8	0,125
2	12,6	0,044	15,0	0,056
3	11,0	0,038	9,1	0,044
4	7,9	0,021	6,6	0,038

A továbbiakban a bauxit vasásványainak szerepét vizsgáltuk a vanádiumtartalom oldódásánál.

A három hazai timföldgyárból származó bauxit vegyelemzési adatait a IX. táblázat tartalmazza. A X. táblázatban a bauxitok feltárásakor keletkezett vörösiszapok elemzési adatait és a vanádiumkihozatali értékeket foglaltuk össze. A XI. táblázat e bauxitok vasásványainak mennyiségi adatait

IX. táblázat

Üzemi bauxitok vegyelemzési adatai, %

Megnevezés	Al_2O_3	SIO_2	Fe_2O_3	TiO_2	V_2O_5	Izz. v.
1. M. óvári bauxit	47,6	5,6	25,5	2,7	0,133	15,7
2. Ajkai bauxit	47,9	6,3	23,1	2,7	0,116	19,6
3. A. füzitői bauxit	48,7	6,9	18,3	2,5	0,100	20,6

X. táblázat

Üzemi bauxitok vörösiszapjainak vegyelemzési adatai, %

Megnevezés	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	V_2O_5	Na_2O	Izz. v.	V_2O_5 kihoz
1. M. óvári buxit	16,8	11,2	50,0	5,5	1,160	9,4	6,9	39,0
2. Ajkai buxit	18.0	11,9	46,4	5,3	0,152	9,9	7,6	35,7
3. A. füzitői bauxit	20,6	13,2	37,9	5,1	0,150	10,4	9,7	28,8

XI. táblázat

Üzemi bauxitok Fe_2O_3-tartalmának fáziselemzési adatai, %

Megnevezés	M. óvári	Ajkai	A. füzitői
	bauxit		
Goethit (FeOOH)	5,5	5,5	9,3
Hematit (Fe_2O_3)	19,4	17,6	9,0
Össz. vas (Fe_2O_3)	25,5	23,1	18,3

XII. táblázat

A vanádiumbeoldódás és a vasásványok fáziselemzési adatainak viszonyszámai

Megnevezés	$\frac{Fe_2O_3\%}{V_2O_5\%}$	old. V_2O_5 kg/t	$\frac{\text{hematit kg/t}}{\text{old. } V_2O_5 \text{ kg/t}}$
1. M. óvári bauxit	192	0,52	373
2. Ajkai bauxit	199	0,41	430
3. A. füzitői bauxit	183	0,28	320

mutatja. A XII. táblázatban pedig feltüntettük a bauxitok Fe_2O_3- és V_2O_5-tartalmának arányát, az egy tonna bauxit feldolgozásakor oldódó V_2O_5 mennyiségét és a hematittartalom, valamint az oldódott V_2O_5 mennyiség viszonyszámát.

A vizsgált bauxitoknál nagyon jól észlelhető a vas- és vanádiumtartalom közötti szoros összefüggés, az oldódott vanádium mennyisége pedig a kevés számú vizsgálat alapján arányosnak vehető a bauxitok hematit tartalmával.

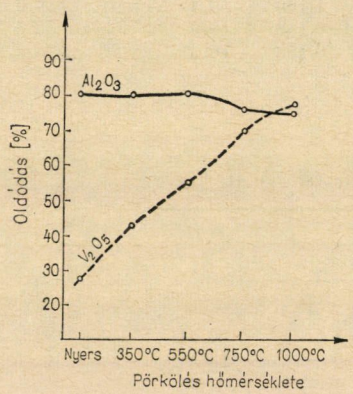
4. Kísérletek a vanádiumtartalom oldódásának növelésére

41. Bauxitpörkölés

Laboratóriumi vizsgálatok és üzemi tapasztalatok egyértelműen azt mutatták, hogy a pörkölés magyar bauxitoknál kedvezően hat a vanádium oldódására a Bayer-eljárásnál.

A számszerű összefüggés megállapítására azonos mennyiségű almásfüzitői üzemi bauxitot pörköltünk 350, 550, 750 és 1000 °C-on, két-két órán keresztül. A súlycsökkenés mérése után a bauxitokat azonos mennyiségű és összetételű aluminátlúgban 240 °C-on 2 órán át feltártuk.

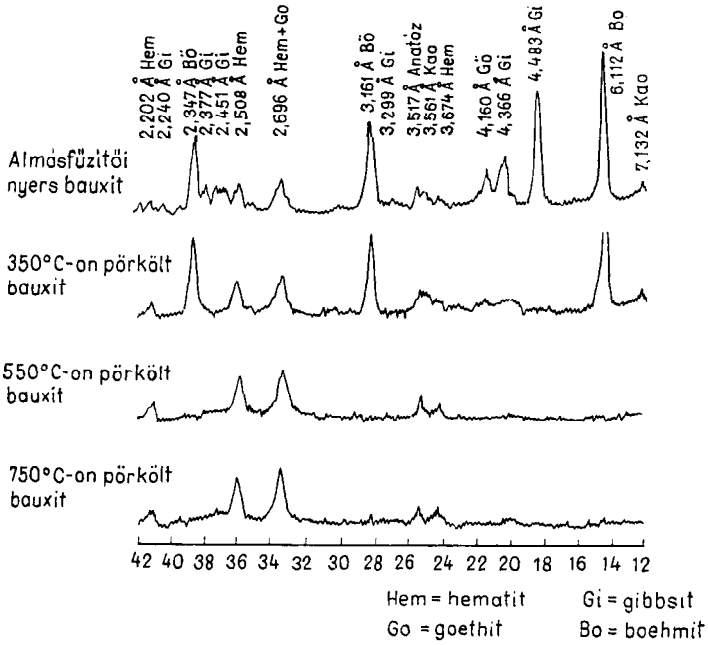
A vörösiszapok elemzési adatai alapján számított kihozatali értékeket a 9. ábrán mutatjuk be.



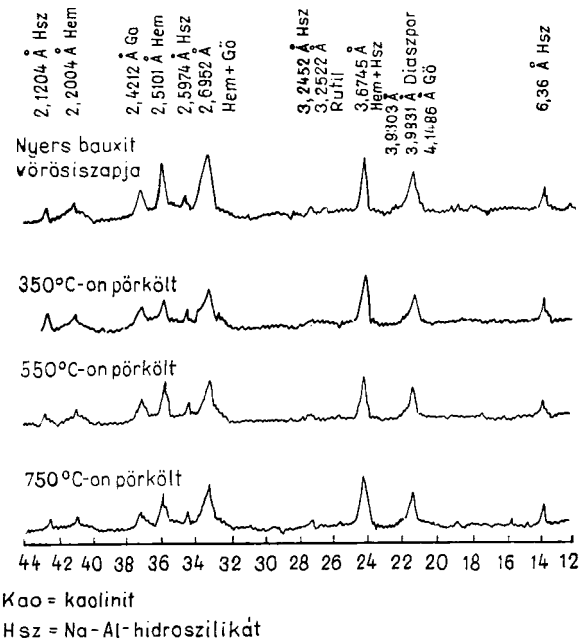
9. ábra. Az Al_2O_3 és V_2O_5 beoldódása a feltáráskor különböző hőmérsékleten pörkölt almásfüzitői üzemi bauxitból

Az általános nézet ellenére feltűnő, hogy 550 °C-os pörkölésnél nem romlott az Al_2O_3-kihozatal. Csak 750 és 1000 °C-nál tapasztalható csökkenés a feltárhatóságban. Mivel a V-oldódása a hőmérséklet emelésével fokozatosan nőtt, megvizsgáltuk a pörkölési időtartam hatását is, azonban azt tapasztaltuk, hogy adott hőmérsékleten még 24 órás pörkölési idő sem változtatja meg jelentősen az oldódást.

A pörkölés során lejátszódó fázisátalakítások tanulmányozására felvettük és a 10.a és 10.b ábrákon bemutatjuk a nyers és pörkölt bauxitok és vörösiszapjaik röntgendiffraktogramjait. Ezekből megállapítható, hogy az alumíniumoxidhidrátok közül a gibbsit csúcsa már 350 °C-on eltűnik, a boehmit vonalai az 550 °C-on pörkölt mintában nem láthatók. A vasásványok közül a goethit csúcsa 550 °C-ig fokozatosan eltűnik, a hematité pedig erősödik, azonban nem olyan mértékben, mint az várható lenne, ha a goethit átalakulása hematittá teljesen végbement volna. Hogy az átalakulás nem ment végbe hematitig, az jól látható a vörösiszapok röntgendiffraktogramjain, ahol a goethit csúcsai egyformán jelentkeznek még a 750°C-on pörkölt bauxit iszapjaiban is. Ez egyértelműen arra utal,



10a ábra. Almásfüzítői üzemi nyers és pörkölt bauxitok röntgendiffraktogramjai



10b. ábra. Almásfüzitői üzemi nyers és pörkölt bauxitok vörösiszapjainak röntgendiffraktogramjai

hogy pörköléskor a vízvesztés következtében megbomlik a kötött vizet tartalmazó ásványok szerkezete, a rácsszerkezet elveszti stabilitását, megkezdődik az átrendeződés, még nem fejeződik be és a feltáráskor vízfelvétellel a goethit zömében vissza alakul. Az alumíniumásványok oldhatósága szintén csak labilis, laza rácsszerkezetek kialakítására enged következtetni, a nehezen oldható γ- és α-Al_2O_3 a vizsgált hőmérsékleten még nem keletkezik jelentős mennyiségben.

Solymár K. [16] kimutatta, hogy a magyar bauxitokban a goethit jelentős mennyiségű, izomor helyettesítéssel a rácsba épült alumíniumot tartalmaz, ami feltáráskor a lúg számára hozzáférhetetlen. A hematit rácsába is épülhet be alumínium, azonban lényegesen kisebb mennyiségben. Nyilvánvaló, hogy a pörkölés rácslazító és átrendező hatásával magyarázható az Al_2O_3-kihozatal növekedése.

42. Nagy hőmérsékletű feltárás

A vasásványok szerkezeti fellazítása és a goethit átalakítása nemcsak termikus kezeléssel, hanem korábbi vizsgálataink szerint [17] hidrotermális úton is megoldható. A feltárólúg koncentrációjától és molviszonyától függően 280÷320 °C között az átalakulás már egy-két óra alatt végbemegy. Ezért vizsgáltuk a V oldódásának mértékét nagy hőmérsékletű feltárás esetén is. Almásfüzitői és ajkai üzemi bauxitokat 308 °C-on 1,5 órán át 200 g/l Na_2O_k tartalmú, 4 molviszonyú aluminátlúgban feltártunk. A vörösiszapok elemzési adatait a XIII. táblázat tartalmazza.

XIII. táblázat

Nagy hőmérsékleten feltárt üzemi bauxitok iszapjainak elemzési adatai, %

Megnevezés	Bemérés g	Iszap g	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	Na_2O	V_2O_5	Izz. v.
A. füzitői bauxit	43	18,5	17,6	15,5	42,0	6,0	11,7	0,08	4,7
Ajkai bauxit	43	19,0	16,1	13,9	48,6	5,6	11,1	0.14	4.8

A vasoxidtartalom alapján számított Al_2O_3- és V_2O_5-kihozatal 84,2, 66,6, illetve 84,1 és 42,6% volt, ami feltevésünket alátámasztja, mivel várhatóan a nagyobb goethittartalmú almásfüzitői bauxitból növekszik jobban a V-oldódás. A szokásosnál nagyobb Al_2O_3-kihozatali értékek szintén a goethit elbomlásával magyarázhatók.

43. Oxidáló adalékos kísérletek a vanádiumoldódás növelésére

Irodalmi adatok reprodukálása céljából kísérleteket végeztünk az almásfüzitői, magyaróvári és ajkai timföldgyárakból származó átlagbauxitokkal oly módon, hogy a feltárásra előkészített zagyokba (150 ml lúg, 43 g bauxit)

adagoltuk a különböző oxidálószereket, majd 2 órás, 240 °C hőmérsékletű feltárások után mértük a vanádiumoldódás mértékét.

A bauxitok és a belőlük nyert vörösiszapok elemzési adatait a XIV. táblázat tartalmazza.

A kísérletek eredményei szerint a feltárásra előkészített zagyba adagolt oxidálószerek még nagyobb mennyiségben sem növelik meg számottevően,

XIV. táblázat

Oxidáló adalékok hatása a V oldhatóságára

Megnevezés	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	Ma_2O	V_2O_5	Izz. v.	V_2O_5 kihoz.%
Almásfüzitői üzemi bauxit	48,7	6,5	17,9	2,5		0,106	21,0	
Almásfüzitői üzemi bauxit adalék nélkül feltárva	17,8	13,5	37,6	5,5	11,9	0,13	10,1	41.2
Almásfüzitői üzemi bauxit + 3 ml Hypó feltárva	18,4	13,4	37,6	5,6	11,8	0,13	9,8	41,0
Almásfüzitői üzemi bauxit + 0,3g Na_2O_2 feltárva	17,9	13,3	37,5	5,6	11,8	0,13	9,8	41,3
Almásfüzitői üzemi bauxit + 0,3 g $K_2S_2O_8$ feltárva	18,0	13,1	35,9	5,6	12,5	0,1	10,1	52,4
Almásfüzitői üzemi bauxit + + 2,5 ml H_2O_2 feltárva	15,0	14,1	40,9	5,4	11,5	0,124	8,7	45,4
Almásfüzitői üzemi bauxit + + 5,0 ml H_2O_2 feltárva	16,3	14,7	39,6	5,3	12,0	0,118	8,3	46.1
Almásfüzitői üzemi bauxit + + 7,5 ml H_2O_2 feltárva	16,1	14,6	40,6	5,3	12,2	0,132	8,3	41.4
Almásfüzitői üzemi bauxit + + 10,0 ml H_2O_2 feltárva	16,6	14,3	39,9	5,3	12,0	0,137	8,4	38,2
Magyaróvári üzemi bauxit	47,9	5,5	26,5	2,9	0	0,13	15,7	
Magyaróvári üzemi bauxit adalék nélkül feltárva	12,5	9,7	50,0	4,9	9,6	0,137	8,1	45.0
Magyaróvári üzemi bauxit + 3 ml Hypó feltárva	11,7	10,0	50,7	5,5	9,4	0,129	7,3	48,8
Magyaróvári üzemi bauxit + 0,3 g Na_2O_2 feltárva	13,0	10,0	50,2	5,2	9,4	0,129	7,9	48,9
Magyaróvári üzemi bauxit + 0,3 g $K_2S_2O_8$ feltárva	13,5	10,0	49,2	5,2	9,6	0,133	7,9	46.1
Ajkai üzemi bauxit	47,9	6,3	23,1	2,9		0,116	16,3	
Ajkai üzemi bauxit adalék nélkül feltárva	13,3	13,6	48,7	5,8	10,5	0,11	7,3	55,0
Ajkai üzemi bauxit + 1 g $NaClO_3$ feltárva	13,0	13,4	48,0	5,8	10,3	0,11	7,3	54.4
Ajkai üzemi bauxit + 1 g $K_2S_2O_8$ feltárva	13,3	13,9	48,0	5,8	10,5	0,10	5,4	59.1
Ajkai üzemi bauxit + 5 ml Hypó feltárva	13,5	13,6	51,1	5,8	10,6	0,13	6,3	48,6

illetve az elemzési hibahatárokon túl, a vanádiumoldódást és csak a $K_2S_2O_8$-adalék okozott egészen kis mértékű V-kihozatalnövekedést az almásfüzitői bauxitból.

5. A vizsgálati eredmények értékelése

A magyar bauxitok vanádiumtartalmának megjelenési formájára, eloszlására és lúgoldhatóságára végzett vizsgálataink eredménye alapján megállapítható, hogy:

— a vanádiumeloszlás a bauxitokban statisztikusan egyenletes; önálló vanádiumásvány vagy helyi dúsulás nem mutatható ki;

— mind makro-, mind mikroméretekben szoros összefüggés észlelhető a vas- és vanádiumtartalom között;

— a vanádium jelentős része sem a szerves anyaggal, sem pedig a titánásványokkal nem lehet kapcsolatban;

— a bauxitok muskovit, turmalin, disztén, gránát, apatit, zirkon, klorit ásványai tartalmazhatnak vanádiumot, azonban ezek mennyisége a vizsgált bauxitokban kicsiny;

— a bauxitok Bayer-eljárás szerinti feltárásakor oldódott vanádium mennyisége arányosnak vehető a hematittartalommal;

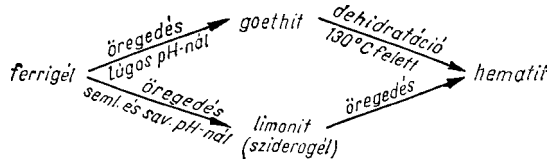
— a feltárási hőmérséklet 300÷320 °C-ra történő növelésével goethites bauxitokból a vanádium oldódása jelentősen növelhető;

— oxidáló szerek adagolása a feltáró lúgba nem befolyásolja a vanádium oldhatóságát;

— a bauxitok pörkölésével a vanádium lúgoldhatósága jelentősen növelhető;

— teljes vanádiumkinyerés csak a vasoxidtartalom kioldásával érhető el.

E megállapítások alapján a vanádium megjelenési formáját illetően arra a következtetésre juthatunk, hogy a vanádium már a bauxitképződés kezdeti szakaszában az üledékes anyag ülepedésekor is jelen volt és valószínű, hogy a ferrigéllel együtt csapódott ki. A bauxitosodás során a ferrigél is átalakult. BÁRDOSSY [8] szerint SCHEFFER, WELTHE és LUDWIEG vizsgálata nyomán az átalakulás a pH változatától függően a következő:



Magyarországon az üledékképződés és a bauxitosodás erősen oxidáló közegben történt, ezért a vastartalom kezdetben teljes egészében ferrigél lehetett. Ez semleges pH-nál limonittá öregedett, lúgos pH-nál pedig goethit keletkezett belőle. Ahogy a pH ingadozott, úgy váltakozott e két ásvány képződése

a bauxitosodás során. A limonit azonban vízvesztéssel gyorsan hematittá alakult, míg a goethit csak sokkal lassabban változik át a természetben hematittá. Az eredeti gél vanádiumtartalma mennyiségileg beépülhetett a goethitbe, semleges és savanyú pH esetében azonban limonit képződött és ez viszonylag gyorsan hematittá kristályosodott, melynek rácsszerkezete már lényegesen tömörebb és így a vanádium nagy része kiszorult a hematit rácsából és a képződött kristály repedéseiben és felületén foglalt helyet igen finom eloszlásban.

Ez a vanádium további oxidációval, mállással különböző kristályokat képezhet (montroseit, doloreseit, duttonit, corvusit stb.), vagy egyéb elemekkel ásványokat alkothat (hewettit, nonalit stb.), esetleg a bauxitosodáskor kialakuló egyéb ásványokba is beépülhet (pirit, rutil, anatáz, muszkovit, klorit stb.).

A ferrigél átkristályosodásakor a rácsból ily módon kiszorult vanádium mennyisége arányos kell hogy legyen a hematittartalommal, ha feltételezzük, hogy a gélben eredetileg jelenlevő vanádium teljes mennyisége beépülhetett az új kristályba a goethites átalakulás során, a hematit szerkezetébe viszont ennek csak kis része juthatott.

A fentiek alapján a vanádium részleges oldódásának okát a magyar bauxitok Bayer-eljárás szerinti feltárásakor abban látjuk, hogy a vanádiumtartalom jelentős része a bauxitokban a vasásványok (elsősorban goethit) izomorf szennyezőiként található és így az üzemi körülmények között a feltáró lúg számára nem hozzáférhető. A szokásos feltárási körülmények között tehát a vanádiumtartalomnak csak az a része oldódik, amelyik a bauxitban lúgoldható vegyületként található, vagy pedig olyan bauxitkomponens izomorf alkotójaként van jelen, amely a feltárás során maga is oldódik.

Az oldódás növelése csak a goethitszerkezet termikus, vagy hidrotermális megbontása, illetve fellazítása útján várható.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki Dr. BÁRDOSSY Györgynek és SOLYMÁR Károlynak a kézirat átnézéséért és értékes tanácsaikért.

IRODALOM

1. A Magyar Népgazdaság vanádiumszükséglete távlati alakulásának hozzávetőleges felmérése és a szükséglet kielégítésének lehetősége hazai nyersanyagforrások elsősorban bauxitvagyonunk figyelembevételével. OMFB tanulmány, 1963.
2. Handbook of Geochemistry II—1. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg. New York 1969, 23 A 1—7.
3. HAMMER. A. I. *Ceramic Age.* **65** (1955) No. 4. pp 47—50. No. 5. pp.. 7—10 No. 6. pp., 19—20 **66** (1955), No. 2, pp., 16—17., No. 3. pp., 18—19 No. 4. pp., 28—29., No. 5. pp 24—27.
4. Терентьева, К. Ф.: Редкие элементы в бокситах. Москва, Госгеолтехиздат, 1959.
5. Бенеславский, С. И.: Минералогия бокситов. Госгеолтехиздат, 1963.
6. Теняков, В. А.: Геохимия, 1965. 6. стр. 733—737.

7. DUDICH, E.—Mrs. L.SIKLÓSSY: Annales instituti geologici publici Hungarici. Vol. LIV. Fasc. 3. Conference on Bauxite Geology, Budapest, 4—8. IX. 1969. Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1970, pp. 319—345.
8. BÁRDOSSY, Gy: A magyar bauxitok geokémiai vizsgálata. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1961.
9. IVEKOVIC, H.: Bulletin International De l'Academie Yugoslavie Des Sciences et Des Beaux Arts, Livre 12 Nouvelle Serie Zagreb, 1954, pp. 93—96.
10. GEDEON, T.: *Bányászati Lapok*, (1954)., 88.
11. BOGÁRDI E.: Timföldgyári aluminátlúgok szennyezései és azok eltávolítása. Mérnöki Továbbképző Intézet, 1955.
12. VERES I.: *Kohászati Lapok*, (1959), 473—476.
12. VERES I.: *Kohászati Lapok*, (1959), 473—476.
13. KLUG, O. és társai: *Fémipari Kutató Intézet Közleményei* **10,** (1971) 45—59.
14. Fémipari Kutató Intézet. Zárójelentés. Száma: 11—32., 1971.
15. HAZAINÉ—SOLYMÁR K.: *Bányászati és Kohászati Lapok*, **101**. (1968). 187—192.
16. SOLYMÁR K.: *Bányászati és Kohászati Lapok*. Kohászat, **102**. (1969), 454—460.
17. ZÁMBÓ J.: Исследование выщелачивания венгерских бокситов и отсаивания их красных шламов. Диссертация. Москва 1957.

Causes of the Partial Dissolution of the Vanadium Content in the Bayer Processing of Hungarian Bauxites. In Hungary, the only industrial raw material source of vanadium is represented by bauxite. If processed according to the Bayer method, however, only about 25 to 33 per cent of the vanadium content of bauxites can be recovered, while the rest will be lost with the red mud. This partial dissolution might be attributed to the occurrence form of the vanadium mineral, as the vanadium cannot be obtained from bauxites by dressing of the extent required for direct mineral determination. On the basis of literary data, authors enumerate the forms of vanadium occurence in nature, and survey the possibility of their appearance in connection with bauxites. In the experimental part they discuss the correlation between the components and vanadium content of bauxite, and the potential increase of dissolution. In conformity with the present geochemical knowledge, the test results reveal that, in the case of Hungarian bauxites, a greater part of the vanadium content is discovered as an isomorphous contaminant of the iron minerals (mainly goethite) and, therefore, it cannot be recovered under the usual operational conditions. An increased dissolution can only be expected through the thermal or hydrothermal decomposition, or the reduction of the goethite structure.

Ursachen des teilweisen Inlösunggehens des Vanadiumgehalts bei der Verarbeitung der ungarischen Bauxite nach dem Bayer-Verfahren. In Ungarn ist die einzige industrielle Rohstoffquelle für Vanadium der Bauxit. Bei der Aufarbeitung des Bauxits nach dem Bayer Verfahren kann jedoch nur 1/3 . . . 1/4 des Vanadiumgehalts gewonnen werden, der übrige Teil geht mit dem Rotschlamm verloren. Die Gründe für das bloß teilweise Inlösunggehen sind in der Erscheinungsform des Vanadiums zu suchen, jedoch kann in dem zur direkten Bestimmung notwendigen Ausmaß das Vanadium aus dem Bauxiten nicht angereichert werden. Daher ist es bisher trotz ausgedehnter Bemühungen nicht gelungen, eine annehmbare und in der Praxis verwertbare Erklärung zu finden. Auf Grund der einschlägigen Literatur untersuchen die Verfasser der Reihe nach die Erscheinungsformen des Vanadiums in der Natur und erwägen die Möglichkeit ihres Vorkommens in den Bauxiten. Im experimentellen Teil untersuchen sie die Beziehungen zwischen den Komponenten des Bauxits und seinem Vanadiumgehalt, und die Möglichkeiten für die Erhöhung der Lösung des Vanadiums. In Übereinstimmung mit den geochemischen Kenntnissen stellen die Verfasser auf Grund der Untersuchungen fest, daß im Falle der ungarischen Bauxite ein bedeutender Teil des Vanadiumgehalts als isomorphe Verunreinigung der Eisenminerale (in erster Reihe des Goethits) zu finden ist und so unter den üblichen Betriebsbedingungen nicht aufgeschlossen werden kann. Vergrößerung des Inlösungs gehens kann nur auf dem Wege der thermischen oder hydrothermalen Aufschließung, bzw. Lockerung des Goethitgefüges erwartet werden.

ORTOGONÁLISAN ANIZOTROP SZERKEZETI ANYAGÚ HENGERES HÉJAK HAJLÍTÁSELMÉLETÉNEK TÁRGYALÁSA AZ ELTOLÓDÁSFÜGGVÉNY BEVEZETÉSÉVEL

VARGA LÁSZLÓ*
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

[Beérkezett 1971. április 16-án]

A dolgozat ortogonálisan anizotrop szerkezeti anyagú (pl.: üvegszállal erősített műanyag) hengeres héjak általános hajlításelméletét tárgyalja, a héjfelületre merőleges élterhelések eseteiben. Először a belső erők és az alakváltozások közötti összefüggéseket ismerteti, majd a hajlítás differenciálegyenleteit közli. A homogén differenciálegyenletrendszert az eltolódásfüggvény bevezetésével oldja meg. Részletesen ismerteti az eltolódásfüggvény és a hajlítási feszültségállapot meghatározását, az alkotó és a főkör mentén ható — periodikusan változó — élterhelések eseteiben. A levezetett összefüggések alapján tetszőleges — Fourier sorral leírható — függvény szerint változó élterhelés okozta hajlítási feszültségállapot is meghatározható. Szerző végül egy a karakterisztikus egyenlet gyökeinek alakulását szemléltető számpéldát közöl.

Jelölések

m	alkotóirányú hullámszám
n	kerületirányú hullámszám
s	héjvastagság [cm]
u	alkotóirányú eltolódás [cm]
v	kerületirányú eltolódás [cm]
w	sugárirányú eltolódás [cm]
x_1	alkotóirányú koordináta [cm]
x_2	kerületirányú koordináta [cm]
x_3	sugárirányú koordináta [cm]
$\bar{x}_1 = x_1/R$	alkotóirányra vonatkozó méretnélküli koordináta
$\bar{x}_2 = x_2/R$	kerületirányra vonatkozó méretnélküli koordináta
B_1	alkotóirányra vonatkozó hajlítómerevség [kp cm]
B_2	kerületirányra vonatkozó hajlítómerevség [kp cm]
B_3	csavarómerevség [kp cm]
D_1	alkotóirányra vonatkozó nyúlásmerevség [kp/cm]
D_2	kerületirányra vonatkozó nyúlásmerevseg [kp/cm]
D_3	nyírómerevség [kp/cm]
E_1	alkotóirányra vonatkozó rugalmassági modulus [kp/cm^2]
E_2	kerületirányra vonatkozó rugalmassági modulus [kp/cm^2]
E_3	nyíró rugalmassági modulus [kp/cm^2]
M_1	alkotóirányú fajlagos nyomaték [cmkp/cm]
M_2	kerületirányú fajlagos nyomaték [cmkp/cm]
M_3	csavaró fajlagos nyomaték [cmkp/cm]
N_1	alkotóirányú metszeterő [kp/cm]
N_2	kerületirányú metszeterő [kp/cm]
N_3	héj síkjában működő nyíró metszeterő [kp/cm]
$P_1(\bar{x}_1)$	alkotó mentén ható — héjfelületre merőleges — élterhelés [kp/cm]
$P_2(\bar{x}_2)$	kerület mentén ható — héjfelületre merőleges — élterhelés [kp/cm]

* Dr. Varga László, Budapest II., Gábor Áron u. 42.

R	a középfelület görbületi sugara [cm]
Q_1	alkotóirányra vonatkozó középfelületre merőleges metszeterő [kp/cm]
Q_2	kerületirányra vonatkozó középfelületre merőleges metszeterő [kp/cm]
β_1	alkotóirányra vonatkozó héjállandó
β_2	kerületirányra vonatkozó héjállandó
ε_1	alkotóirányú fajlagos nyúlás
ε_2	kerületirányú fajlagos nyúlás
ε_3	fajlagos szögelfordulás
η	deriválást jelző szám
ν_{12}, ν_{21}	Poisson tényezők (az első index az alakváltozás irányát, a második az erő irányát jelzi)
Φ_m	kerületirányra vonatkozó csillapodásfüggvény
ψ_n	alkotóirányra vonatkozó csillapodásfüggvény
σ_1	alkotóirányú normálfeszültség [kp/cm^2]
σ_2	kerületirányú normálfeszültség [kp/cm^2]
σ_3	a héj síkjában ható nyírófeszültség [kp/cm^2]

További jelölések értelme a szöveg között található.

1. Bevezetés

A szokásos szerkezeti anyagú (izotrop) héjak általános hajlításelméletének tárgyalása a szakirodalomban több helyen is: például FLÜGGE [1] és WLASSOW [2] munkájában megtalálható. Ugyancsak fellelhetők az anizotrop héjak vizsgálatával foglalkozó szakdolgozatok is, amelyekről AMBARTSUMIAN [3] nyújt rövid áttekintést. Ezek közül különös figyelmet érdemelnek AMBARTSUMIAN [4] és [5] cikkei, amelyek az anizotrop, illetve az ortotrop héjak hajlításának részletes tárgyalását tartalmazzák.

A hivatkozott dolgozatok többségükben a feszültségállapot meghatározására szolgáló alapösszefüggéseket és általános módszereket ismertetnek. Gyakorlati számítások során mindig a közölt alapösszefüggések képezik a vizsgálatok gerincét, az ismertetett módszerek azonban nem zárják ki a további megfontolások lehetőségét, illetve célravezetőbb számítási módszerek kidolgozását.

Az ortotrop héjakra levezetett alapösszefüggések felhasználásával vizsgálhatók az üvegszállal erősített műanyag héjak (nyomástartó edények, tartályok, csövek stb.) is, amelyek jó korrózióállóságuk, viszonylag nagy szilárdságuk és kis fajsúlyuk eredményeként mind gyakrabban kerülnek felhasználásra. Szilárdsági tulajdonságaik következtében ugyanis ortotrop anyagként kezelhetők. Rugalmassági jellemzőik mérhetők, vagy — az üvegszál és a műanyag rugalmas tulajdonságainak, az összetevők részarányának és az erősítés irányának ismeretében — számíthatók (lásd pl. [6]-ban). Ezek meghatározásával a jelen dolgozatban nem foglalkozunk, hanem az ortotropia főirányaira vonatkozó rugalmassági jellemzőket ismertnek vesszük.

A vizsgálatok tárgyát ortotrop hengeres héjak képezik. Az ortotropia főirányai azonosak a héj alkotó- és kerületirányával.

A vizsgálatok során homogén anizotropiával számolunk és feltételezzük, hogy a húzó- vagy nyomóigénybevételek hatására fellépő fajlagos alakváltozások abszolút értékei egyenlőek és Hooke törvényét követik.

A közölt feltételeket kielégítő hengeren helyi jellegű — a héjfelületre merőleges — élterhelések hatását vizsgáljuk. Feltevésünk szerint a külső terhelés változását leíró függvény Fourier sorba fejthető. Az áttekinthetőség biztosítása és a leírás egyszerűsítése érdekében csak a függvénysor egy (m vagy n-edik) tagját vesszük figyelembe, mivel a számítások a többi tagra vonatkozólag ugyanúgy végezhetők.

Az ortotrop hengeres héjban ébredő hajlítási feszültségállapot meghatározására szolgáló számítási módszer kidolgozása az eltolódásfüggvény bevezetésével történik.

2. A belső erők és az alakváltozások közötti összefüggések

Az ortotrop anyagban ébredő feszültségek és a fellépő fajlagos alakváltozások közötti összefüggések Hooke törvénye alapján a merevségi főirányokban (síkbeli feszültségállapot feltételezésével) a következő alakban írhatók:

$$\sigma_1 = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}(\varepsilon_1 + \nu_{12}\varepsilon_2),$$

$$\sigma_2 = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}(\varepsilon_2 + \nu_{21}\varepsilon_1), \qquad (1a-c)$$

$$\sigma_3 = E_3\varepsilon_3.$$

A fajlagos alakváltozások — mint ismeretes — kifejezhetők a középfelület eltolódásaival, az alábbiak szerint [1]:

$$\varepsilon_1 = \frac{u'}{R} - x_3\frac{w''}{R^2},$$

$$\varepsilon_2 = \frac{v'}{R} - \frac{x_3}{R}\frac{w''}{R + x_3} + \frac{w}{R + x_3}, \qquad (2a-c)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{u'}{R + x_3} + \frac{R + x_3}{R^2}v' - \frac{w''}{R}\left(\frac{x_3}{R} + \frac{x_3}{R + x_3}\right).$$

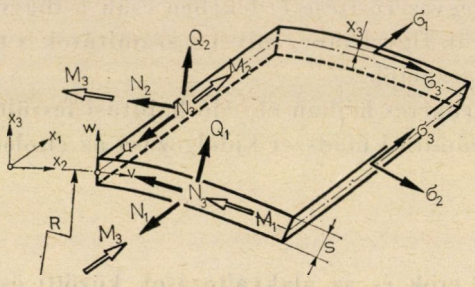
A közölt összefüggésekben a deriválást jelentő jelölések értelme a következő:

$$\frac{\partial(\ )}{\partial x_1/R} = \frac{\partial(\ )}{\partial \bar{x}_1} = (\ )'$$

$$\frac{\partial(\ )}{\partial x_2/R} = \frac{\partial(\ )}{\partial \bar{x}_2} = (\ )'$$

A középfelületre helyezett koordinátarendszert és a belső erőket az 1. ábra szemlélteti.

Az (1a—c) és (2a—c) összefüggések birtokában már előállíthatók a metszeterők, fajlagos nyomatékok és az eltolódások közötti kapcsolatot leíró függvények is, amelyek — a vékony héjak eseteiben megengedhető elhanyagolá-



1. ábra

sokkal élve — a következő alakban írhatók (1. ábra):

$$N_1 = \int_{-s/2}^{s/2} \sigma_1 \left(1 + \frac{x_3}{R}\right) dx_3 \approx \frac{D_1}{R}\,[u' + \nu_{12}(v^{\cdot} + w)],$$

$$N_2 = \int_{-s/2}^{s/2} \sigma_2\, dx_3 \approx \frac{D_2}{R}\,(\nu_{21}\, u' + v^{\cdot} + w), \qquad (3a-d)$$

$$N_3 = \int_{-s/2}^{s/2} \sigma_3 \left(1 + \frac{x_3}{R}\right) dx_3 \approx \int_{-s/2}^{s/2} \sigma_3\, dx_3 \approx \frac{D_3}{R}\,(u^{\cdot} + v'),$$

$$M_1 = -\int_{-s/2}^{s/2} \sigma_1 \left(1 + \frac{x_3}{R}\right) x_3\, dx_3 \approx \frac{B_1}{R^2}\,(w'' + \nu_{12}\, w^{\cdot\cdot}).$$

$$M_2 = -\int_{-s/2}^{s/2} \sigma_2\, x_3\, dx_3 \approx \frac{B_2}{R^2}\,(w^{\cdot\cdot} + \nu_{21}\, w''), \qquad (3e-f)$$

$$M_3 = -\int_{-s/2}^{s/2} \sigma_3 \left(1 + \frac{x_3}{R}\right) x_3\, dx_3 \approx -\int_{-s/2}^{s/2} \sigma_3\, x_3\, dx_3 \approx 2\,\frac{B_3}{R^2}\, w^{\cdot\cdot},$$

ahol

$$D_1 = \frac{E_1\, s}{1 - \nu_{12}\,\nu_{21}}, \qquad B_1 = \frac{E_1\, s^3}{12(1 - \nu_{12}\,\nu_{21})},$$

$$D_2 = \frac{E_2\, s}{1 - \nu_{12}\,\nu_{21}} \qquad B_2 = \frac{E_2\, s^3}{12(1 - \nu_{12}\,\nu_{21})}, \qquad (4a-f)$$

$$D_3 = E_3\, s, \qquad B_3 = \frac{E_3\, s^3}{12}.$$

A (3a—f) alatti összefüggések levezetése során az élerők pontos kifejezésében szereplő B_i-vel szorzott tagokat figyelmen kívül hagytuk [1]. Az elhanyagolásból származó hiba alakulása a

$$k = \frac{B_i}{R^2 D_i} = \frac{s^2}{12R^2}$$

tényező függvénye, amely vékony héjak eseteiben ($R/s \geq 100$) rendkívül kis érték, így az egység mellett jogosan elhagyható. További elhanyagolást jelent, hogy a fajlagos nyomatékok kifejezésében az eltolódások magasabb rendű deriváltjai mellett az alacsonyabb rendűeket elhagytuk [1].

A vizsgálat tárgyát képező vékony héjak eseteiben — a közölt elhanyagolások után — a gyakorlat számára elfogadható pontosságú, könnyen kezelhető összefüggések birtokába jutunk.

3. A hajlítás differenciálegyenletei

A hengeres héj feszültségállapotát leíró differenciálegyenletek felírása a (3a—f) összefüggések felhasználásával és az egyensúlyi egyenletek birtokában lehetséges. A héjelem egyensúlyi egyenletei — mint ismeretes — jó közelítéssel az alábbi alakban írhatók [1]:

$$\begin{aligned} &N_1' + N_3' = 0\,, \\ &N_2' + N_3' \approx 0\,, \\ &Q_1' + Q_2' + N_2 = 0\,, \\ &M_2' + M_3' - RQ_2 = 0\,, \\ &M_1' + M_3' - RQ_1 = 0\,. \end{aligned} \qquad \text{(5a—e)}$$

A felírt egyensúlyi egyenletekkel kapcsolatban megkívánjuk jegyezni, hogy az erők egyensúlyát leíró (5b) kifejezésben a viszonylag kicsiny Q_2 metszeterő még kisebb kerületirányú komponensét elhagytuk, továbbá hiányzik az x_3 tengely körüli nyomatéki egyensúlyt kifejező összefüggés, amelytől — mint érdektelentől — továbbiakban eltekintettünk [1].

A feszültségi állapotot meghatározó differenciálegyenletek felírásához az (5c) egyensúlyi egyenletet — az (5d—e) összefüggések felhasználásával — célszerű a következő alakra hozni:

$$RN_2 + M_1'' + M_2'' + 2M_3'' = 0\,. \qquad \text{(5c)}$$

A metszeterők és fajlagos nyomatékok (3a—f) alatti kifejezéseit az (5a—c) egyensúlyi egyenletekbe helyettesítve rendezés után a keresett differenciálegyenletekhez jutunk:

$$u'' + \frac{E_3}{E_1^*}\, u'' + \left(\frac{E_3}{E_1^*} + \nu_{12}\right) v'' + \nu_{12}\, w' = 0\,,$$

$$\left(\frac{E_3}{E_2^*} + \nu_{21}\right) u'' + v'' + \frac{E_3}{E_2^*}\, v'' + w' = 0\,, \tag{6a—c}$$

$$\nu_{21}\, u' + v + w + k\left[\frac{E_1}{E_2}\, w'''' + 2\left(2\,\frac{E_3}{E_2^*} + \nu_{21}\right) w'''' + \ddot{\ddot{w}}\right] = 0\,,$$

ahol

$$k = \frac{1}{12}\,\frac{s^2}{R^2}\,; \qquad E_i^* = \frac{E_i}{1 - \nu_{12}\,\nu_{21}}\,.$$

A feszültségállapot meghatározásához a (6a—c) homogén differenciálegyenletrendszer megoldása útján juthatunk.

4. A differenciálegyenletek megoldása az eltolódásfüggvény bevezetésével

A helyi jellegű élterhelések okozta hajlítófeszültségi állapotot leíró (6a—c) homogén differenciálegyenletrendszer viszonylag egyszerű megoldásához az

$$\mathfrak{F} = \mathfrak{F}(\bar{x}_1\,, \bar{x}_2) \tag{7}$$

eltolódásfüggvény bevezetésével juthatunk. Ehhez először is fejezzük ki a középfelület eltolódásait az eltolódásfüggvény segítségével. Előzőleg megjegyezzük, hogy ez a függvénykapcsolat — *izotrop* szerkezeti anyagok esetében — WLASSOW [2] művében megtalálható. Ezt a következőkben *ortotrop* anyagokra fogjuk általánosítani az alábbiak szerint:

$$u = \mathfrak{F}''' - \nu_{21}\,\mathfrak{F}'''\,,$$

$$v = -\,\mathfrak{F}''' - \left(\frac{E_1}{E_3} - \nu_{21}\right)\mathfrak{F}'''\,, \tag{8a—c}$$

$$w = \frac{E_1}{E_2}\,\mathfrak{F}'''' + \left(\frac{E_1}{E_3} - 2\nu_{21}\right)\mathfrak{F}'''' + \mathfrak{F}''''\,.$$

Az eltolódások (8a—c) alatti kifejezéseit a (6a—c) egyenletrendszerbe helyettesítve, az első két egyenletnél azonosságra jutunk, a harmadikból pedig a következő differenciálegyenletet kapjuk:

$$\mathfrak{F}^{\mathrm{VIII}} + 4n_1\,\mathfrak{F}^{\mathrm{VI}} + 6n_2\,\mathfrak{F}^{\mathrm{IV}} + 4n_3\,\mathfrak{F}^{\mathrm{II}} + n_4\,\mathfrak{F}'''' + 4\beta_2^4\,\mathfrak{F}^{\mathrm{IV}} = 0\,. \tag{9}$$

(Az eltolódásfüggvény fölé rajzolt római számok az $\bar{x}_1$ szerinti deriválások számát jelentik.)

Az együtthatók az

$$n_1 = \frac{E_2}{E_1}\left(\frac{E_3}{E_2^*} + \frac{1}{4}\frac{E_1}{E_3}\right),$$

$$n_2 = \frac{E_2}{E_1}\left(1 + \frac{1}{3}\frac{E_2}{E_3}\nu_{21} - \frac{4}{3}\frac{E_3}{E_2^*}\nu_{12} - \frac{4}{3}\nu_{12}\nu_{21}\right),$$

$$n_3 = \frac{E_2}{E_1}n_1, \qquad (10a-e)$$

$$n_4 = \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^2,$$

$$\beta_2 = \sqrt[4]{3(1-\nu_{12}\nu_{21})\frac{E_2}{E_1}\left(\frac{R}{s}\right)^2}$$

összefüggésekből számíthatók.

Természetesen a metszeterők és a fajlagos nyomatékok is kifejezhetők az eltolódásfüggvénnyel. Az eltolódások (8a—c) alatti kifejezéseit a (3a—f) összefüggésekbe helyettesítve, és az (5d—e) egyensúlyi egyenleteket figyelembe véve, a következő képletekhez jutunk:

$$N_1 = \frac{D_1}{R}(1-\nu_{12}\nu_{21})\mathfrak{F}^{II\cdot\cdot},$$

$$N_2 = \frac{D_1}{R}(1-\nu_{12}\nu_{21})\mathfrak{F}^{IV}, \qquad (11a-c)$$

$$N_3 = -\frac{D_1}{R}(1-\nu_{12}\nu_{21})\mathfrak{F}^{III\cdot},$$

$$M_1 = \frac{B_1}{R^2}\left[\frac{E_1}{E_2}\mathfrak{F}^{VI} + \left(\frac{E_1}{E_3} - \nu_{21}\right)\mathfrak{F}^{IV\cdot\cdot} + \right.$$

$$\left. + \left(1 + \nu_{12}\frac{E_1}{E_3} - 2\nu_{12}\nu_{21}\right)\mathfrak{F}^{II::} + \nu_{12}\mathfrak{F}^{:::}\right],$$

$$M_2 = \frac{B_1}{R^2}\left[\nu_{21}\mathfrak{F}^{VI} + \left(1 + \nu_{21}\frac{E_2}{E_3} - 2\nu_{12}\nu_{21}\right)\mathfrak{F}^{IV\cdot\cdot} + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{E_2}{E_3} - \nu_{12}\right)\mathfrak{F}^{II::} + \frac{E_2}{E_1}\mathfrak{F}^{:::}\right],$$

$$M_3 = 2\frac{B_1}{R^2}(1 - \nu_{12}\nu_{21})\left[\frac{E_3}{E_2}\mathfrak{F}^{V\cdot} + \left(1 - 2\nu_{21}\frac{E_3}{E_1}\right)\mathfrak{F}^{III::} + \frac{E_3}{E_1}\mathfrak{F}^{I:::}\right],$$

$$Q_1 = \frac{B_1}{R^3}\left[\frac{E_1}{E_2}\mathfrak{F}^{VII} + \left[2\frac{E_3}{E_2^*} + \frac{E_1}{E_3} - \nu_{21}\right]\mathfrak{F}^{V\cdot\cdot} + \right.$$

$$\left. + \left(3 + \nu_{12}\frac{E_1}{E_3} - 4\nu_{21}\frac{E_3}{E_1^*} - 4\nu_{12}\nu_{21}\right)\mathfrak{F}^{III::} + \left(2\frac{E_3}{E_1^*} + \nu_{12}\right)\mathfrak{F}^{I:::}\right], \tag{11d–h}$$

$$Q_2 = \frac{B_1}{R^3}\left[\left(2\frac{E_3}{E_2^*} + \nu_{21}\right)\mathfrak{F}^{VI\cdot} + \left(3 + \nu_{21}\frac{E_2}{E_3} - 4\nu_{21}\frac{E_3}{E_1^*} - 4\nu_{12}\nu_{21}\right)\mathfrak{F}^{IV:\cdot} + \right.$$

$$\left. + \left(2\frac{E_3}{E_1^*} + \frac{E_2}{E_3} - \nu_{12}\right)\mathfrak{F}^{II::\cdot} + \frac{E_2}{E_1}\mathfrak{F}^{::::}\right].$$

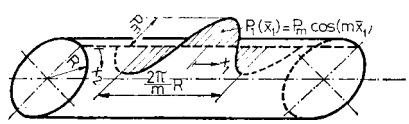
Az eltolódások, valamint a metszeterők és fajlagos nyomatékok kifejezésében szereplő eltolódásfüggvény tényleges alakját — a külső terhelés ismeretében — a (9) differenciálegyenlet megoldása útján határozhatjuk meg. A megoldás módját, illetve az eltolódásfüggvény tényleges alakjának és a feszültségi állapotnak a meghatározását két terhelési alapesetre a következő fejezetekben ismertetjük.

5. Az alkotó mentén ($\bar{x}_2$ = állandó) ható élterhelés okozta hajlítási feszültségállapot meghatározása

Vizsgálatainkhoz — az áttekinthetőség érdekében — tételezzük fel, hogy a héjfelületre merőleges külső élterhet

$$P_1(\bar{x}_1) = P_m \cos(m\bar{x}_1) \tag{12}$$

összefüggés írja le (2. ábra).



2. ábra

Az eltolódásfüggvény a terheléshez hasonló alakú:

$$\mathfrak{F} \equiv \mathfrak{F}_1 = \Phi_m \cos(m\bar{x}_1). \tag{13}$$

A (13) összefüggésben szereplő:

$$\Phi_m = \Phi_m(\bar{x}_2) \tag{14}$$

„*csillapodásfüggvény*" tényleges alakjához a (9) differenciálegyenlet megoldása

útján juthatunk el, amely a (13) összefüggés behelyettesítése és a műveletek elvégzése után a következő alakot ölti:

$$[\Phi_m^{IV} - 4m_1 m^2 \Phi_m'' + 6m_2 m^4 \Phi_m'' - \\ - 4m_3 m^6 \Phi_m + m_4 m^8 \Phi_m + 4\beta_1^4 m^4 \Phi_m] \cos(m\bar{x}_1) = 0. \tag{15}$$

Itt

$$m_1 = \frac{E_3}{E_2^*} + \frac{1}{4}\frac{E_1}{E_3},$$

$$m_2 = \frac{E_1}{E_2}\left(1 + \frac{1}{3}\frac{E_2}{E_3}\nu_{21} - \frac{4}{2}\frac{E_3}{E_2^*}\nu_{12} - \frac{4}{3}\nu_{12}\nu_{21}\right),$$

$$m_3 = \frac{E_1}{E_2} m_1, \tag{16a—e}$$

$$m_4 = \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^2,$$

$$\beta_1 = \sqrt[4]{3(1 - \nu_{12}\nu_{21})\frac{E_1}{E_2}\left(\frac{R}{s}\right)^2}.$$

Megoldásul a

$$\Phi_m = C_m e^{\lambda_m \bar{x}_2} \tag{17}$$

függvényt vesszük fel; a benne előforduló együtthatók a

$$\lambda_m^8 - 4m_1 m^2 \lambda_m^6 + 6m_2 m^4 \lambda_m^4 - 4m_3 m^6 \lambda_m^2 + m_4 m^8 = -4\beta_1^4 m^4 \tag{18}$$

karakterisztikus egyenletből számíthatók. A megoldást jelentő konjugált komplex gyökök kifejezései a következők:

$$\begin{aligned} \lambda_{m1} &= -\alpha_{m1} + \beta_{m1} i, & \lambda_{m5} &= \alpha_{m1} + \beta_{m1} i, \\ \lambda_{m2} &= -\alpha_{m1} - \beta_{m1} i, & \lambda_{m6} &= \alpha_{m1} - \beta_{m1} i, \\ \lambda_{m3} &= -\alpha_{m2} + \beta_{m2} i, & \lambda_{m7} &= \alpha_{m2} + \beta_{m2} i, \\ \lambda_{m4} &= -\alpha_{m2} - \beta_{m2} i, & \lambda_{m8} &= \alpha_{m2} - \beta_{m2} i. \end{aligned} \tag{19a—h}$$

Viszonylag hosszú hengeres héjak eseteiben — mint ismeretes [1] — elegendő csak a (19a—d) alatti gyökök figyelembevétele.

Így a csillapodásfüggvény a

$$\Phi_m = C_{m1}\bar{\Phi}_{m1} + C_{m2}\bar{\Phi}_{m2} + C_{m3}\bar{\Phi}_{m3} + C_{m4}\bar{\Phi}_{m4} = \sum_{j=1}^{4} C_{mj}\bar{\Phi}_{mj} \tag{20}$$

alakban írható, amelyben szereplő $\bar{\Phi}_{mj}$ függvények a

$$\bar{\Phi}_{m1} = e^{-\alpha_{m1}\bar{x}_2} \cos(\beta_{m1}\bar{x}_2), \tag{21a}$$

$$\bar{\Phi}_{m2} = e^{-\alpha_{m1}\bar{x}_2} \sin(\beta_{m1}\bar{x}_2),$$

$$\bar{\Phi}_{m3} = e^{-\alpha_{m2}\bar{x}_2} \cos(\beta_{m2}\bar{x}_2), \tag{21b–d}$$

$$\bar{\Phi}_{m4} = e^{-\alpha_{m2}\bar{x}_2} \sin(\beta_{m2}\bar{x}_2)$$

összefüggésekből számíthatók .

Az eltolódásfüggvény tényleges alakja a vizsgált élterhelés esetén tehát:

$$\mathfrak{F}_1 = \sum_{j=1}^{4} C_{mj}\bar{\Phi}_{mj} \cos(m\bar{x}_1). \tag{22}$$

A C_{mj} integrálási állandókat a peremfeltételek figyelembevételével lehet meghatározni. Ehhez először az eltolódásokat fejezzük ki, valamint a metszeterőket és fajlagos nyomatékokat a (22) alatti eltolódásfüggvény segítségével.

A (8a—c) összefüggések értelmében:

$$u_m = \sum_{j=1}^{4} - C_{mj}(m\bar{\Phi}''_{mj} + \nu_{21} m^3 \bar{\Phi}_{mj}) \sin(m\bar{x}_1),$$

$$v_m = \sum_{j=1}^{4} C_{mj}\left[\left(\frac{E_1}{E_3} - \nu_{21}\right) m^2 \bar{\Phi}'_{mj} - \bar{\Phi}'''_{mj}\right] \cos(m\bar{x}_1), \tag{24a–c}$$

$$w_m = \sum_{j=1} C_{mj}\left[\frac{E_1}{E_2} m^4 \bar{\Phi}_{mj} - \left(\frac{E_1}{E_3} - 2\nu_{21}\right) m^2 \bar{\Phi}''_{mj} + \bar{\Phi}''''_{mj}\right] \cos(m\bar{x}_1).$$

Továbbá a (11a—h) kifejezések szerint:

$$N_{1m} = \frac{D_1}{R}(1 - \nu_{12}\nu_{21}) \sum_{j=1}^{4} - C_{mj} m^2 \bar{\Phi}''_{mj} \cos(m\bar{x}_1),$$

$$N_{2m} = \frac{D_1}{R}(1 - \nu_{12}\nu_{21}) \sum_{j=1}^{4} C_{mj} m^4 \bar{\Phi}_{mj} \cos(m\bar{x}_1),$$

(24a—h)

$$N_{3m} = \frac{D_1}{R}(1 - \nu_{12}\nu_{21}) \sum_{j=1}^{4} C_{mj} m^3 \bar{\Phi}'_{mj} \sin(m\bar{x}_1),$$

$$M_{1m} = \frac{B_1}{R^2} \sum_{j=1}^{4} C_{mj}\left[\nu_{12}\bar{\Phi}'''_{mj} - \left(1 + \nu_{12}\frac{E_1}{E_3} - 2\nu_{12}\nu_{21}\right) m^2 \bar{\Phi}''_{mj} + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{E_1}{E_3} - \nu_{21}\right) m^4 \bar{\Phi}''_{mj} - \frac{E_1}{E_2} m^6 \bar{\Phi}_{mj}\right] \cos(m\bar{x}_1),$$

$$M_{2m} = \frac{B_1}{R^2} \sum_{j=1}^{4} C_{mj} \left[\frac{E_2}{E_1} \bar{\Phi}_{mj}^{:::} - \left(\frac{E_2}{E_3} - \nu_{12} \right) m^2 \bar{\Phi}_{mj}^{::} + \right.$$
$$\left. + \left(1 + \nu_{21} \frac{E_2}{E_3} - 2\nu_{12}\nu_{21} \right) m^4 \bar{\Phi}_{mj}^{\cdot\cdot} - \nu_{21} m^6 \bar{\Phi}_{mj} \right] \cos(m\bar{x}_1),$$

$$M_{3m} = 2\frac{B_1}{R^2}(1 - \nu_{12}\nu_{21}) \sum_{j=1}^{4} C_{mj} \left[- \frac{E_3}{E_1} m \bar{\Phi}_{mj}^{:::} + \right.$$
$$\left. + \left(1 - 2\nu_{21} \frac{E_3}{E_1} \right) m^3 \bar{\Phi}_{mj}^{::} - \frac{E_3}{E_2} m^5 \bar{\Phi}_{mj}^{\cdot} \right] \sin(m\bar{x}_1),$$

$$Q_{1m} = \frac{B_1}{R^3} \sum_{j=1}^{4} C_{mj} \left[- \left(2\frac{E_3}{E_1^*} + \nu_{12} \right) m \bar{\Phi}_{mj}^{:::} + \right.$$
$$+ \left(3 + \nu_{12} \frac{E_1}{E_3} - 4\nu_{21} \frac{E_3}{E_1^*} - 4\nu_{12}\nu_{21} \right) m^3 \bar{\Phi}_{mj}^{::} -$$
$$\left. - \left(2\frac{E_3}{E_2^*} + \frac{E_1}{E_3} - \nu_{21} \right) m^5 \bar{\Phi}_{mj}^{\cdot\cdot} + \frac{E_1}{E_2} m^7 \bar{\Phi}_{mj} \right] \sin(m\bar{x}_1),$$

$$Q_{2m} = \frac{B_1}{R^3} \sum_{j=1}^{4} C_{mj} \left[\frac{E_2}{E_1} \bar{\Phi}_{mj}^{:::\cdot} - \left(2\frac{E_3}{E_1^*} + \frac{E_2}{E_3} - \nu_{12} \right) m^2 \bar{\Phi}_{mj}^{:::} + \right.$$
$$+ \left(3 + \nu_{21} \frac{E_2}{E_3} - 4\nu_{21} \frac{E_3}{E_1^*} - 4\nu_{12}\nu_{21} \right) m^4 \bar{\Phi}_{mj}^{\cdot\cdot} -$$
$$\left. - \left(2\frac{E_3}{E_2^*} + \nu_{21} \right) m^6 \bar{\Phi}_{mj}^{\cdot} \right] \cos(m\bar{x}_1).$$

Az eltolódások, valamint a metszeterők és fajlagos nyomatékok kifejezésében szereplő csillapodásfüggvény deriváltjai a következő képletekből számíthatók:

$$\begin{aligned}
\bar{\Phi}_{m1}^{(\eta)} &= e^{-\alpha_{m1}\bar{x}_2} \left[A_{1\eta} \cos(\beta_{m1}\bar{x}_2) + A_{2\eta} \sin(\beta_{m1}\bar{x}_2) \right], \\
\bar{\Phi}_{m2}^{(\eta)} &= e^{-\alpha_{m1}\bar{x}_2} \left[A_{1\eta} \sin(\beta_{m1}\bar{x}_2) - A_{2\eta} \cos(\beta_{m1}\bar{x}_2) \right], \\
\bar{\Phi}_{m3}^{(\eta)} &= e^{-\alpha_{m2}\bar{x}_2} \left[A_{3\eta} \cos(\beta_{m2}\bar{x}_2) + A_{4\eta} \sin(\beta_{m2}\bar{x}_2) \right], \\
\bar{\Phi}_{m4}^{(\eta)} &= e^{-\alpha_{m2}\bar{x}_2} \left[A_{3\eta} \sin(\beta_{m2}\bar{x}_2) - A_{4\eta} \cos(\beta_{m2}\bar{x}_2) \right].
\end{aligned} \tag{25a—d}$$

Az $A_{j\eta}$ együtthatók pedig az alábbi összefüggéseket jelentik:

$$\begin{aligned}
A_{1\eta} &= -\alpha_{m1} A_{1(\eta-1)} + \beta_{m1} A_{2(\eta-1)}, \\
A_{2\eta} &= -\alpha_{m1} A_{2(\eta-1)} - \beta_{m1} A_{1(\eta-1)}, \\
A_{3\eta} &= -\alpha_{m2} A_{3(\eta-1)} + \beta_{m2} A_{4(\eta-2)}, \\
A_{4\eta} &= -\alpha_{m2} A_{4(\eta-1)} - \beta_{m2} A_{3(\eta-1)},
\end{aligned} \tag{26a—d}$$

ahol

$$A_{10} = A_{30} = 1\,,$$
$$A_{20} = A_{40} = 0\,. \tag{27a—b}$$

A C_{mj} integrálási állandókat — az alkotó mentén ($\bar{x}_2 = 0$) ható élterhelések esetén — a következő illesztési feltételek szabják meg:

$$\begin{aligned} v_m(\bar{x}_1, 0) &= 0\,,\\ w_m(\bar{x}_1, 0) &= 0\,,\\ N_{3m}(\bar{x}_1, 0) &= 0\,,\\ Q_{2m}(\bar{x}_1, 0) &= 1/2\, P_1(\bar{x}_1)\,. \end{aligned} \tag{28a—d}$$

Az illesztési feltételeket az eltolódásfüggvény segítségével kifejezve az alábbiak adódnak:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{4} (-1)^{j+1} C_{mj} A_{j1} &= 0\,,\\ \sum_{j=1}^{4} (-1)^{j+1} C_{mj} A_{j3} &= 0\,,\\ \sum_{j=1}^{4} (-1)^{j+1} C_{mj} A_{j5} &= 0\,,\\ \sum_{j=1}^{4} (-1)^{j+1} C_{mj} A_{j7} &= 2\beta_1^4 \frac{R}{s} \frac{P_m}{E_1}\,. \end{aligned} \tag{29a—d}$$

Az integrálási állandók meghatározása után már felírható — a vizsgált külső terhelésre vonatkozó — eltolódásfüggvény tényleges alakja. Ennek ismeretében a hajlítás feszültségállapotát képviselő alakváltozások, metszeterők és fajlagos nyomatékok (tehát a feszültségek is) további nehézség nélkül számíthatók.

6. A főkör mentén ($\bar{x}_1$ = állandó) ható élterhelés okozta hajlítási feszültségállapot meghatározása

Az alkotóirányú élteher esetéhez hasonlóan feltételezzük, hogy a héjfelületre merőleges külső élterhelés a

$$P_2(\bar{x}_2) = P_n \cos(n\bar{x}_2) \tag{30}$$

összefüggés szerint változik (3. ábra).

Az eltolódásfüggvény a terhelés jellegének megfelelően

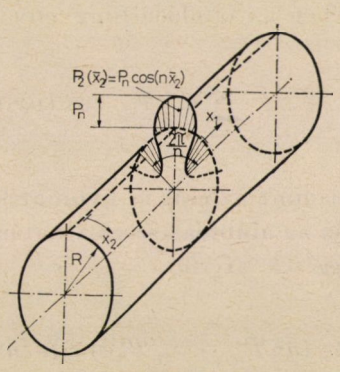
$$\mathfrak{F} \equiv \mathfrak{F}_2 = \Psi_n \cos(n\bar{x}_2) \tag{31}$$

alakba írható. A (31) összefüggésben előforduló:

$$\Psi_n = \Psi_n(\bar{x}_1) \tag{32}$$

„*csillapodásfüggvény*" tényleges alakja szintén a (9) differenciálegyenlet megoldása útján adódik, amely a (31) összefüggés behelyettesítése és a műveletek elvégzése után a következő alakra hozható:

$$[\Psi_n^{\mathrm{VIII}} - 4n_1 n^2 \Psi_n^{\mathrm{VI}} + 6n_2 n^4 \Psi_n^{\mathrm{IV}} - 4n_3 n^6 \Psi_n^{\mathrm{II}} + \\ + n_4 n^8 \Psi_n + 4\beta_2^4 \Psi_n^{\mathrm{IV}}] \cos(n\bar{x}_2) = 0. \tag{33}$$



3. ábra

A differenciálegyenlet megoldásai jelen esetben is

$$\Psi_n = C_n e^{\lambda_n \bar{x}_1} \tag{34}$$

alakban írhatók fel és a λ_n együtthatók a

$$\lambda_n^8 - 4n_1 n^2 \lambda_n^6 + 6n_2 n^4 \lambda_n^4 - 4n_3 n^6 \lambda_n^2 + n_4 n^8 = -4\beta_2^4 \lambda_n^4 \tag{35}$$

karakterisztikus egyenletből számíthatók. A megoldást jelentő konjugált komplex gyökök kifejezései a következők:

$$\begin{aligned} \lambda_{n1} &= -\alpha_{n1} + \beta_{n1} i, & \lambda_{n5} &= \alpha_{n1} + \beta_{n1} i, \\ \lambda_{n2} &= -\alpha_{n1} - \beta_{n1} i, & \lambda_{n6} &= \alpha_{n1} - \beta_{n1} i, \\ \lambda_{n3} &= -\alpha_{n2} + \beta_{n2} i, & \lambda_{n7} &= \alpha_{n2} + \beta_{n2} i, \\ \lambda_{n4} &= -\alpha_{n2} - \beta_{n2} i, & \lambda_{n8} &= \alpha_{n2} - \beta_{n2} i. \end{aligned} \tag{36a—h}$$

A (36a—d) alatti négy gyök figyelembevétele után (viszonylag hosszú hengeres héjakat vizsgálva) a csillapodásfüggvény

$$\Psi_n = C_{n1} \overline{\Psi}_{n1} + C_{n2} \overline{\Psi}_{n2} + C_{n3} \overline{\Psi}_{n3} + C_{n4} \overline{\Psi}_{n4} = \sum_{j=1}^{4} C_{nj} \overline{\Psi}_{nj} \tag{37}$$

alakban írható, amelyben szereplő $\overline{\Psi}_{nj}$ függvények a

$$\begin{aligned}
\overline{\Psi}_{n1} &= e^{-\alpha_{n1}\bar{x}_1} \cos(\beta_{n1}\bar{x}_1),\\
\overline{\Psi}_{n2} &= e^{-\alpha_{n1}\bar{x}_1} \sin(\beta_{n1}\bar{x}_1),\\
\overline{\Psi}_{n3} &= e^{-\alpha_{n2}\bar{x}_1} \cos(\beta_{n2}\bar{x}_1),\\
\overline{\Psi}_{n4} &= e^{-\alpha_{n2}\bar{x}_1} \sin(\beta_{n2}\bar{x}_1)
\end{aligned} \qquad (38a-d)$$

összefüggésekből számíthatók.

Az előzőek értelmében az eltolódásfüggvény tényleges alakja a vizsgált élterhelés esetén

$$\mathfrak{F}_2 = \sum_{j=1}^{4} C_{nj}\,\overline{\Psi}_{nj}\cos(n\bar{x}_2). \qquad (39)$$

Az eltolódások, valamint az erők és nyomatékok kifejezései a (39) összefüggés helyettesítése után az alábbiak szerint határozhatók meg.

A (8a—c) összefüggések szerint

$$\begin{aligned}
u_n &= \sum_{j=1}^{4} -C_{nj}(n^2\,\overline{\Psi}^{\mathrm{I}}_{nj} + \nu_{21}\,\overline{\Psi}^{\mathrm{III}}_{nj})\cos(n\bar{x}_2),\\
v_n &= \sum_{j=1}^{4} C_{nj}\left[\left(\frac{E_1}{E_3} - \nu_{21}\right) n\,\overline{\Psi}^{\mathrm{II}}_{nj} - n^3\,\overline{\Psi}_{nj}\right]\sin(n\bar{x}_2), \qquad (40a-c)\\
w_n &= \sum_{j=1}^{4} C_{nj}\left[\frac{E_1}{E_2}\,\overline{\Psi}^{\mathrm{IV}}_{nj} - \left(\frac{E_1}{E_3} - 2\nu_{21}\right) n^2\,\overline{\Psi}^{\mathrm{II}}_{nj} + n^4\,\overline{\Psi}_{nj}\right]\cos(n\bar{x}_2).
\end{aligned}$$

Továbbá a (11a—h) képletek értelmében

$$\begin{aligned}
N_{1n} &= \frac{D_1}{R}(1-\nu_{12}\nu_{21})\sum_{j=1}^{4} -C_{nj}\,n^2\,\overline{\Psi}^{\mathrm{II}}_{nj}\cos(n\bar{x}_2),\\
N_{2n} &= \frac{D_1}{R}(1-\nu_{12}\nu_{21})\sum_{j=1}^{4} C_{nj}\,\overline{\Psi}^{\mathrm{IV}}_{nj}\cos(n\bar{x}_2), \qquad (41a-h)\\
N_{3n} &= \frac{D_1}{R}(1-\nu_{12}\nu_{21})\sum_{j=1}^{4} C_{nj}\,n\,\overline{\Psi}^{\mathrm{III}}_{nj}\sin(n\bar{x}_2),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{1n} = \frac{B_1}{R^2}\sum_{j=1}^{4} C_{nj}\Bigg[&\frac{E_1}{E_2}\,\overline{\Psi}^{\mathrm{VI}}_{nj} - \left(\frac{E_1}{E_3} - \nu_{21}\right) n^2\,\overline{\Psi}^{\mathrm{IV}}_{nj} +\\
&+ \left(1 + \nu_{12}\frac{E_1}{E_3} - 2\nu_{12}\nu_{21}\right) n^4\,\overline{\Psi}^{\mathrm{II}}_{nj} - \nu_{12}\,n^6\,\overline{\Psi}_{nj}\Bigg]\cos(n\bar{x}_2),
\end{aligned}$$

$$M_{2n} = \frac{B_1}{R^2} \sum_{j=1}^{4} C_{nj} \left[\nu_{21} \overline{\Psi}_{nj}^{\mathrm{VI}} - \left(1 + \nu_{21} \frac{E_2}{E_3} - 2\nu_{12}\nu_{21}\right) n^2 \overline{\Psi}_{nj}^{\mathrm{IV}} + \right.$$
$$\left. + \left(\frac{E_2}{E_3} - \nu_{12} \right) n^4 \overline{\Psi}_{nj}^{\mathrm{II}} - \frac{E_2}{E_1} n^6 \overline{\Psi}_{nj} \right] \cos(n\bar{x}_2),$$

$$M_{3n} = 2\frac{B_1}{R^2}(1 - \nu_{12}\nu_{21}) \sum_{j=1}^{4} C_{nj} \left[- \frac{E_3}{E_2} n \overline{\Psi}_{nj}^{\mathrm{V}} + \right.$$
$$\left. + \left(1 - 2\nu_{21}\frac{E_3}{E_1}\right) n^3 \overline{\Psi}_{nj}^{\mathrm{III}} - \frac{E_3}{E_1} n^5 \overline{\Psi}_{nj}^{\mathrm{I}} \right] \sin(n\bar{x}_2),$$

$$Q_{1n} = \frac{B_1}{R^3} \sum_{j=1}^{4} C_{nj} \left[\frac{E_1}{E_2} \overline{\Psi}_{nj}^{\mathrm{VII}} - \left(2\frac{E_3}{E_2^*} + \frac{E_1}{E_3} - \nu_{21}\right) n^2 \overline{\Psi}_{nj}^{\mathrm{V}} + \right.$$
$$+ \left(3 + \nu_{12}\frac{E_1}{E_3} - 4\nu_{21}\frac{E_3}{E_1^*} - 4\nu_{12}\nu_{21}\right) n^4 \overline{\Psi}_{nj}^{\mathrm{III}} -$$
$$\left. - \left(2\frac{E_3}{E_1^*} + \nu_{12}\right) n^6 \overline{\Psi}_{nj}^{\mathrm{I}} \right] \cos(n\bar{x}_2),$$

$$Q_{2n} = \frac{B_1}{R^3} \sum_{j=1}^{4} C_{nj} \left[- \left(2\frac{E_3}{E_2^*} + \nu_{21}\right) n \overline{\Psi}_{nj}^{\mathrm{VI}} + \right.$$
$$+ \left(3 + \nu_{21}\frac{E_2}{E_3} - 4\nu_{21}\frac{E_3}{E_1^*} - 4\nu_{12}\nu_{21}\right) n^3 \Psi_{nj}^{\mathrm{IV}} -$$
$$\left. - \left(2\frac{E_3}{E_1^*} + \frac{E_2}{E_3} - \nu_{12}\right) n^5 \overline{\Psi}_{nj}^{\mathrm{II}} + \frac{E_2}{E_1} n^7 \overline{\Psi}_{nj} \right] \sin(n\bar{x}_2).$$

A csillapodásfüggvény deriváltjai — az előző fejezetben közöltekhez hasonlóan — a következő képletekből számíthatók:

$$\begin{aligned}
\overline{\Psi}_{n1}^{(\eta)} &= e^{-\alpha_{n1}\bar{x}_1} \left[B_{1\eta} \cos(\beta_{n1}\bar{x}_1) + B_{2\eta} \sin(\beta_{n1}\bar{x}_1) \right], \\
\overline{\Psi}_{n2}^{(\eta)} &= e^{-\alpha_{n1}\bar{x}_1} \left[B_{1\eta} \sin(\beta_{n1}\bar{x}_1) - B_{2\eta} \cos(\beta_{n1}\bar{x}_1) \right], \\
\overline{\Psi}_{n3}^{(\eta)} &= e^{-\alpha_{n2}\bar{x}_1} \left[B_{3\eta} \cos(\beta_{n2}\bar{x}_1) + B_{4\eta} \sin(\beta_{n2}\bar{x}_1) \right], \\
\overline{\Psi}_{n4}^{(\eta)} &= e^{-\alpha_{n2}\bar{x}_1} \left[B_{3\eta} \sin(\beta_{n2}\bar{x}_1) - B_{4\eta} \cos(\beta_{n2}\bar{x}_1) \right].
\end{aligned} \qquad (42a-d)$$

A $B_{j\eta}$ együtthatók meghatározására szolgáló összefüggések:

$$\begin{aligned}
B_{1\eta} &= -\alpha_{n1} B_{1(\eta-1)} + \beta_{n1} B_{2(\eta-1)}, \\
B_{2\eta} &= -\alpha_{n1} B_{2(\eta-1)} - \beta_{n1} B_{1(\eta-1)}, \\
B_{3\eta} &= -\alpha_{n2} B_{3(\eta-1)} + \beta_{n2} B_{4(\eta-1)}, \\
B_{4\eta} &= -\alpha_{n2} B_{4(\eta-1)} - \beta_{n2} B_{3(\eta-1)},
\end{aligned} \qquad (43a-d)$$

ahol

$$B_{10} = B_{30} = 1\,,$$
$$B_{20} = B_{40} = 0\,. \tag{44a—b}$$

A C_{nj} integrálási állandókat — a henger végeitől távol eső főkör mentén ($\bar{x}_1 = 0$) ható élterhelés esetén — az alábbi illesztési feltételek kielégítése útján határozzuk meg:

$$\begin{aligned} &u_n(0, \bar{x}_2) = 0\,,\\ &w_n'(0, \bar{x}_2) = 0\,,\\ &N_{3n}(0, \bar{x}_2) = 0\,,\\ &Q_{1n}(0, \bar{x}) = 1/2 P_2(\bar{x}_2)\,. \end{aligned} \tag{45a—d}$$

Az eltolódásfüggvény bevezetése után az illesztési feltételek a következő egyszerűbb alakra hozhatók:

$$\begin{aligned} &\sum_{j=1}^{4} (-1)^{j+1} C_{nj} B_{j1} = 0\,,\\ &\sum_{j=1}^{4} (-1)^{j+1} C_{nj} B_{j3} = 0\,,\\ &\sum_{j=1}^{4} (-1)^{j+1} C_{nj} B_{j5} = 0\,,\\ &\sum_{j=1}^{4} (-1)^{j+1} C_{nj} B_{j7} = 2\beta_2^4 \frac{R}{s} \frac{P_n}{E_1}\,. \end{aligned} \tag{46a—d}$$

(Megjegyezni kívánjuk, hogy a hengert végtelen hosszúnak tekintjük, így megtámasztási peremfeltételek nincsenek.)

Az integrálási állandók meghatározásával lényegében a problémát is megoldottuk. A C_{nj} állandók számszerű értékeit az eltolódások, továbbá az élerők és élnyomatékok kifejezéseibe helyettesítve a főkör mentén ható — héjfelületre merőleges — élterhelés okozta hajlítófeszültségi állapothoz jutunk.

Számpélda

A hajlítási feszültségállapot meghatározása során a legnagyobb nehézséget a (18) és (35) alatti karakterisztikus egyenletek gyökeinek a kiszámítása jelenti. Számszerű vizsgálataink ezért a gyökök együtthatóinak a meghatározására összpontosulnak.

A számításokat üvegszállal erősített poliészter csőre végeztük, főkör mentén ható élterhelés feltételezésével.

Az alkotók közül a poliészter rugalmas jellemzői a következők:

$$E_M = 40\,000 \text{ kp/cm}^2,$$

$$\nu_M = 0{,}35\,,$$

$$G_M = \frac{E_M}{2(1+\nu_M)} = 14\,814 \text{ kp/cm}^2;$$

az üvegszálaké pedig:

$$E_U = 730\,000 \text{ kp/cm}^2\,,$$

$$\nu_U = 0{,}22\,,$$

$$G_U = \frac{E_U}{2(1+\nu_U)} = 299\,180 \text{ kp/cm}^2.$$

Az ortotropia főirányaira vonatkozó rugalmas jellemzőket — $\omega = 54°45'$ tekercselési szög és 65%-os üvegszáltartalom feltételezésével — számítottuk [6] és a következő értékeket kaptuk:

$$E_1 = 102\,526 \text{ kp/cm}^2,$$

$$E_2 = 195\,904 \text{ kp/cm}^2,$$

$$E_3 = 125\,487 \text{ kp/cm}^2,$$

$$\nu_{12} = 0{,}7708,$$

$$\nu_{21} = 0{,}4034.$$

A közölt jellemzőket, továbbá az $R/s = 100$ értéket számításba véve a (10a—e) összefüggések szerint a (35) alatti karakterisztikus egyenlet a következő alakot ölti:

$$\lambda_n^8 - 4{,}934732n^2\lambda_n^6 + 3{,}717818n^4\lambda_n^4 - 9{,}429139n^6\lambda_n^2 + \\ + 3{,}651041n^8 = -157999{,}9\lambda_n^4.$$

A gyökök, illetve az α_{n1}, α_{n2}, β_{n1} és β_{n2} együtthatók meghatározása viszonylag bonyolult program kidolgozása után ICT 1905 tip. számítógépen történt, $n = 4, 8, \ldots 200$ hullámszámok eseteire. A kapott eredmények az I. táblázatban találhatók.

I. táblázat

Ortotrop anyagra vonatkozó együtthatók

n	α_{n1}	α_{n2}	β_{n1}	β_{n2}
4	14,7989	0,8210	13,4034	0,7435
8	16,7565	3,6098	11,3962	2,4550
12	17,9127	9,7116	6,8028	3,6882
16	19,7994	16,8059	4,8984	4,2341
20	24,3577	21,3951	6,0155	5,2838
24	29,0538	25,8482	7,1292	6,3425
28	33,8071	30,2445	8,2739	7,4019
32	38,5868	34,6148	9,4319	8,4609
36	43,3803	38,9713	10,5967	9,5196
40	48,1815	43,3202	11,7562	10,5780
44	52,9868	47,6649	12,9357	11,6363
48	57,7950	52,0069	14,1075	12,6945
52	62,5061	56,3469	15,2803	13,7527
56	67,4165	60,6856	16,4536	14,8107
60	72,2284	65,0239	17,6272	15,8688
64	77,0409	69,3615	18,8011	16,9268
68	81,8540	73,6986	19,9752	17,9848
72	86,6673	78,0354	21,1495	19,0428
76	91,4809	82,3719	22,3239	20,1008
80	96,2948	86,7082	23,4984	21,1588
84	101,1083	91,0448	24,6728	22,2168
88	105,9225	95,3808	25,8474	23,2748
92	110,7364	99,7171	27,0119	24,3328
96	115,5506	104,0530	28,1966	25,3907
100	120,3649	108,3889	29,3713	26,4487
104	125,1792	112,7247	30,5460	27,5066
108	129,9934	117,0606	31,7207	28,5646
112	134,8082	121,3960	32,8957	29,6225
116	139,6222	125,7322	34,0702	30,6805
120	144,4366	130,0679	35,2450	31,7385
124	149,2508	134,4038	36,4197	32,7964
128	154,0651	138,7394	37,5944	33,8544
132	158,8597	143,0753	38,7692	34,9123
136	163,6941	147,4110	39,9440	35,9703
140	168,5085	151,7468	41,1188	37,0283
144	173,3230	156,0824	42,2936	38,0862
148	178,1374	160,4182	43,4683	39,1442
152	182,9520	164,7538	44,6432	40,2021
156	187,7661	169,0897	45,8178	41,2601
160	192,5812	173,4249	46,9929	42,3180
164	197,3955	177,7607	48,1676	43,3760
168	202,2093	182,0970	49,3421	44,4340
172	207,0242	186,4322	50,5171	45,4919
176	211,8386	190,7681	51,6919	46,5499
180	216,6534	195,1034	52,8668	47,6078
184	221,4671	199,4398	54,0413	48,6658
188	226,2819	203,7752	55,2162	49,7237
192	231,0962	208,1110	56,3909	50,7817
196	235,9112	212,4462	57,5660	51,8396
200	240,7254	216,7821	58,7407	52,8976

II. táblázat

Izotrop anyagra vonatkozó együtthatók

n	α_{n1}	α_{n2}	β_{n1}	β_{n2}
4	13,5033	0,6492	12,2643	0,5897
8	15,6059	2,7518	10,9272	1,9268
12	18,8772	6,0231	9,7447	3,1092
16	22,6288	9,7748	8,9765	3,8775
20	26,5322	13,6782	8,4815	4,3725
24	30,4883	17,6342	8,1437	4,7103
28	34,4657	21,6116	7,9002	4,9538
32	38,4530	25,5989	7,7168	5,1372
36	42,4452	29,5912	7,5738	5,2802
40	46,4403	33,5862	7,4593	5,3947
44	50,4370	37,5829	7,3656	5,4884
48	54,4347	41,5806	7,2874	5,5666
52	58,4331	45,5790	7,2213	5,6327
56	62,4318	49,5778	7,1645	5,6894
60	66,4309	53,5769	7,1154	5,7386
64	70,4302	57,5762	7,0724	5,7816
68	74,4297	61,5756	7,0344	5,8196
72	78,4293	65,5752	7,0007	5,8533
76	82,4289	69,5749	6,9705	5,8835
80	86,4287	73,5746	6,9433	5,9107
84	90,4284	77,5744	6,9187	5,9352
88	94,4282	81,5742	6,8964	5,9576
92	98,4281	85,5740	6,8760	5,9780
96	102,4279	89,5739	6,8573	5,9967
100	106,4278	93,5738	6,8400	6,0130
104	110,4277	97,5737	6,8242	6,0298
108	114,4277	101,5736	6,8095	6,0445
112	118,4276	105,5736	6,7958	6,0582
116	122,4275	109,5735	6,7831	6,0709
120	126,4275	113,5743	6,7712	6,0828
124	130,4274	117,5734	6,7601	6,0939
128	134,4274	121,5733	6,7497	6,1043
132	138.4274	125,5733	6,7399	6,1141
136	142,4273	129,5733	6,7307	6,1233
140	146,4273	133,5732	6,7220	6,1319
144	150,4273	137,5732	6,7138	6,1401
148	154,4272	141,5732	6,7061	6,1479
152	158,4272	145,5732	6,6981	6,1552
156	162,4275	149,5731	6,6918	6,1622
160	166,4272	153,5731	6,6852	6,1688
164	170,4272	157,5731	6,6789	6,1751
168	174,4272	161,5731	6,6729	6,1811
172	178,4272	165,5731	6,6671	6,1868
176	182,4271	169,5731	6,6617	6,1923
180	186,4271	173,5731	6,6565	6,1975
184	190,4271	177,5731	6,6515	6,2025
188	194,4271	181,5730	6,6467	2,2073
192	198,4271	185,5730	6,6421	6,2118
196	202,4271	189,5730	6,6377	6,2162
200	206,4271	193,5730	6,6335	6,2205

Összehasonlítás céljából ugyancsak kiszámítottuk az izotrop szerkezeti anyagra vonatkozó együtthatókat az

$$E_1 = E_2 = E\,,$$

$$\nu_{12} = \nu_{21} = \nu = 0{,}3,$$

$$E_3 = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

rugalmas jellemzők figyelembevételével.

A karakterisztikus egyenlet ez esetben másodfokúra redukálható, így a gyökök meghatározása lényegesen egyszerűsödik [7]. A számított együtthatókat a II. táblázat tartalmazza.

Az I. és II. táblázat tanúsága szerint nincs lényeges különbség az ortotrop és az izotrop héjra kiszámított együtthatók, ezzel együtt a gyökök alakulásában. Így a közölt módszer alkalmazhatóságára az izotrop héjra végzett számszerű vizsgálatok alapján következtethetünk. Ilyen jellegű számítások a szakirodalomban [7] találhatók. Ezek szerint például az egységnyi ívhosszon ható állandó jellegű élterhelés okozta legnagyobb feszültségek is viszonylag egyszerűen — a Fourier sor kb. 25 tagjának figyelembevételével — már elfogadható pontossággal számíthatók. Az előzőek értelmében tehát az eltolódásfüggvény bevezetése az ortotrop héjak vizsgálatát is egyszerűvé teszi.

IRODALOM

1. Flügge, W.: Stresses in Shells. Berlin, Springer Verlag 1960.
2. Wlassow, S.: Allgemeine Schalentheorie und ihre Anwendung in der Technik. Berlin, Akademia Verlag 1958.
3. Ambartsumian, S.: Some Current Aspects of the Theory of Anisotropic Layered Shells. *Applied Mechanics Surveys*, Washington D. C., 1966.
4. Ambartsumian, S.: On the General Theory of Anisotropic Shells. *Prikl. Mat. Mekh.*, **22.** (1958.)
5. Ambartsumian, S.—Peshtmaldzhian, D.: On the Theory of Ortotropic Shells and Plates. *Izv. Akad. Nauk Arm. SSR*, Ser. Fiz.—Mat. Nauk 12, no. 1, 1959.
6. Varga, L.: Üvegszállal erősített műanyagok rugalmas tulajdonságai. *Műanyag és Gumi* **8.** (1971), 7. szám.
7. Varga, L.: Bestimmung der durch Apparatpratzen geweckten Spannungen und Ausbildung der optimalen Pratzenkonstruktion, I und II. *Periodica Polytechnica* **12** (1968) und **12.** (1969).

Discussion of the Bending Theory of Cylindrical Shells of Orthogonally Anisotropic Structural Material, by Introducing the Displacement Function. The general bending theory of cylindrical shells of orthogonally anisotropic structural material (e. g. glass reinforced plastic) in the case of edge loads normal to the shell surface is discussed. First the correlations between internal forces and deformation are explained, then the differential equations of bending are presented. This homogeneous differential equation system is solved by introducing the displacement function. Determination of the displacement function and bending

stress state in the case of periodically changing edge loads acting along the generatrix and the great circle is dealt with in detail. On the basis of the relations thus derived, the bending stress state caused by an edge load varying according to an optional function, readily described by the Fourier series, can also be determined. Finally, a numerical example illustrating the root development of the characteristic equation is shown.

Behandlung der Biegetheorie von zylindrischen Schalen aus orthogonal anisotropischem Material mittels Einführung der Verschiebungsfunktion. Gegenstand der Arbeit ist die allgemeine Biegetheorie von zylindrischen Schalen aus orthogonal anisotropischem Werkstoff (z.B. glasfaserverstärktem Kunststoff) für den Fall von auf die Schalenoberfläche normalen Linienbelastungen. Zuerst werden die Zusammenhänge zwischen den inneren Kräften und den Formänderungen beschrieben und dann werden die Differentialgleichungen der Biegung vorgelegt. Das homogene Differentialgleichungssystem wird durch die Einführung der Verschiebungsfunktion gelöst. Eingehend werden die Berechnung der Verschiebungsfunktion und des Biegespannungszustandes vorgeführt, für den Fall von periodisch wechselnden Linienbelastungen entlang der Erzeugenden und des Leitkreises. Auf Grund der abgeleiteten Beziehungen kann auch ein solcher Biegespannungszustand berechnet werden, welcher von einer, gemäß einer beliebigen — durch eine Fourierschen Reihe beschreibbaren — Funktion wechselnden Linienbelastung verursacht wird. Zum Schluß veröffentlicht der Verfasser ein Zahlenbeispiel welches den Verlauf der Wurzeln der charakteristischen Gleichung veranschaulicht.

SZÁRÍTÓBERENDEZÉSEK SZÁMÍTÓGÉPI MÉRETEZÉSE

PALÁNCZ BÉLA*

és

PARTI MIHÁLY**

[Beérkezett 1971. május 15-én]

Az elektronikus számítógép alkalmazása lehetőséget ad arra, hogy a fizikai jelenségeket leíró egyenleteket az analitikus megoldás érdekében a szokásos elhanyagolásoktól mentesen, numerikusan megoldjuk. A dolgozat a szakaszos és folyamatos szárítás esetén mutatja be a matematikai modell megalkotását az anyag- és hőmérlegekből adódó differenciálegyenletek felírásával és peremfeltételeik meghatározásával. Az alkalmazást több numerikus példán keresztül mutatja be, amelyekből kiolvashatók a szokásos elhanyagolások hatása a szárítási időre, illetve a szükséges szárítófelület méretezésére vonatkozólag. A módszer lehetőséget ad folyamatos ellenáramú szárító méretezésére is.

Jelölések

a, b	állandók
c_{na}	a száradó nedves anyag fajhője kcal/kg °C
c_{nL}	a nedves levegő fajhője kcal/kg °C
c_{PwG}	a levegőben gőzállapotú nedvesség állandó nyomáson vett fajhője kcal/kg °C
c_w	a nedvesség fajhője kcal/kg °C
f	korrekciós faktor
$f_é$	érintkezési felület m²
i_L	levegő entalpiája kcal/kg
i_{na}	nedves anyag entalpiája kcal/kg
i_w	nedvesség entalpiája kcal/kg
k_{kd}	kondukciós hőátbocsátási tényező kcal/m² h°C
q_{kd}	kondukciós hőáram kcal/m² h
q_{kv}	konvekciós hőáram kcal/m² h
q_s	száradó anyagba belépő hőáram kcal/m² h
r_F	a nedvesség rejtett hője a felületi hőfokon kcal/kg
r_0	a nedvesség rejtett hője 0 C°-on kcal/kg
r_{tH}	a nedvesség rejtett hője a harmatponti hőfokon kcal/kg
t_F	felületi hőfok °C
t_H	harmatponti hőfok °C
t_k	kondukciós hőfok °C
t_r	sugárzó hőforrás hőfoka °C
x_F	felületen a levegő nedvességtartalma kg nedv./kg száraz levegő
x_L	a levegő nedvességtartalma a főtömegben kg nedv./kg száraz levegő
$F_é$	szükséges érintkezési felület m²
G_{sz}	a száraz anyag mennyisége kg, ill. kg/h
L	a száraz levegő mennyisége kg/h
N	párolgási sebesség kg/m² h

* Paláncz Béla, Budapest, XI., Salétrom utca 9.
** Parti Mihály, Budapest, XI., Kende utca 18.

X	a száradó anyag nedvességtartalma kg nedv./kg száraz anyag
α_{kv}	konvekciós hőátadási tényező kcal/m² h °C
α_r	sugárzási hőátadási tényező kcal/m² h °C
λ_{na}	nedves anyag hővezetési tényezője kcal/m h °C
σ	párolgási tényező kg nedv./m² h
τ	idő h
ψ	függvénykapcsolat jele
Φ	differenciális adszorpciós hő kcal/kg
$\Phi_{1,2}$	integrális adszorpciós hő kcal/kg

Bevezetés

A különböző halmazállapotú anyagok nedvességtartalma különféle módszerekkel — műveletekkel — távolítható el. Ezen műveletek közül a nedvesség kalorikus úton gáz áramban történő eltávolítását szárításnak nevezzük, de a nedvességtartalomnak pl. mechanikus úton történő csökkentését nem tekintjük szárításnak.

A szárítási művelet többféleképpen is osztályozható, de a legkézenfekvőbb a folyamatosság szerinti osztályozás, nevezetesen a *szakaszos szárítás* és a *folyamatos szárítás*.

A szakaszos szárítás ténylegesen egy félfolyamatos művelet, amelynek során a szárítandó anyag folyamatosan áramló szárítóközeggel érintkezik, s az elpárolgott nedvesség a szárítóközeggel eltávozik. A folyamatos szárításnál mind a szárítandó anyag, mind a szárítóközeg folyamatosan, egyen- vagy ellenáramban halad át a készüléken.

A szárítás — mint általában a kalorikus műveletek — költséges folyamat, így a fajlagos szárítóközeg- és hőszükségletnek, valamint a berendezés főméreteinek meghatározása gazdaságossági szempontból igen lényeges. A méretezési módszerek többsége grafikus vagy grafo-analitikus [1, 2] — még jelentős elhanyagolások esetén is —, és így a számítási munka időtrabló.

A következőkben a szakaszos és a folyamatos szárítási műveletek alapvető hő- és anyagmérlegeinek felírása után a méretezéshez szükséges differenciálegyenleteket határozzuk meg, amelyeket elektronikus számítógépen oldunk meg. Tehát az eddigi — elhanyagolásokkal dolgozó — grafikus vagy grafo-analitikus módszereket numerikus módszerekkel helyettesítjük. Tanulmányunkban az elhanyagolások okozta hibákra is rámutatunk.

1. Szakaszos szárítási feladat

a) *A matematikai modell*

A szakaszos szárítás költséges művelet, így alkalmazása kis kapacitású folyamatokra, kísérleti üzemi vagy fejlesztési munkákra célszerű, illetve értékes anyagok szárítására, amelyeknél a szárítási művelet megnövekedett költsége nem változtatja meg lényegesen a teljes költséget.

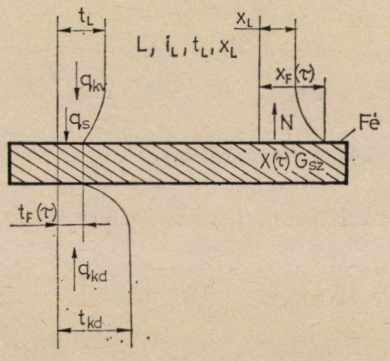
Az 1. ábra szakaszosan száradó nedves anyagot ábrázol, amely felett az ábrán megadott állapotjelzőjű szárítóközeg áramlik, és a teljes érintkező felület $F_é$.

A száradó anyag által tartalmazott nedvesség anyagmérlege:

$$G_{sz}\,X = G_{sz}\,(X+dX)+NF_é\,d\tau\,,$$

amelyből az

$$N = -\frac{G_{sz}}{F_é}\,\frac{dX}{d\tau}\,, \tag{1}$$



1. ábra

értéket, tehát a szárítási sebességet kaptuk.

Írjunk fel hőmérleget a nedves anyagra:

$$G_{sz}\,i_{na}+(q_s+q_{kd})\,F_é\,d\tau = G_{sz}(i_{na}+di_{na})+NF_é\,i_w\,d\tau\,,$$

ahol a levegőben t hőmérsékleten, gőz állapotban jelenlevő nedvesség entalpiája:

$$i_w = c_w\,t_H+r_{tH}+c_{PwG}(t-t_H)\approx r_0+c_{PwG}\,t\,,$$

mivel a nedves anyagból kilépő nedvesség hőfoka a felületi hőfokkal egyező $t = t_F$, és minthogy egységnyi tömegű száraz anyagot tartalmazó nedves anyag entalpiája:

$$i_{na} = (c_{sz}+Xc_w)\,t_{na}+\Phi_{1,2}\,(X)\,,$$

amelynek teljes differenciálja:

$$di_{na} = (c_{sz}+Xc_w)\,dt_{na}+c_w\,t_{na}\,dX+\frac{d\Phi_{1,2}}{dX}\,dX\,,$$

és

$$c_{na} = c_{sz}+Xc_w\,,$$

$$\Phi = \frac{d\Phi_{1,2}}{dX}\,,$$

$$di_{na} = c_{na}\,dt_{na}+c_w\,t_{na}\,dX+\Phi dX\,.$$

A fenti hőmérlegbe helyettesítve

$$q_s+q_{kd}=\frac{G_{sz}\,c_{na}}{F_{\acute{e}}}\,\frac{dt_{na}}{d\tau}+\frac{G_{sz}}{F_{\acute{e}}}\,\frac{dX}{d\tau}\,c_w\,t_{na}+$$

$$+\frac{G_{sz}}{F_{\acute{e}}}\,\frac{dX}{d\tau}\,\Phi+N(r_0+c_{PwG}\,t_F).$$

Az (1) figyelembevételével, továbbá feltételezve, hogy a nedves anyag hőmérséklete a felületi hőmérséklettel egyezik meg ($\lambda_{na}=\infty$, nincs hőfokgradiens):

$$q_s+q_{kd}=\frac{G_{sz}\,c_{na}}{F_{\acute{e}}}\,\frac{dt_F}{d\tau}-\frac{G_{sz}}{F_{\acute{e}}}\,\frac{dX}{d\tau}\,(r_0+c_{PwG}\,t_F-c_w\,t_F-\Phi). \tag{2}$$

Írjunk fel hőmérleget a határrétegre:

$$q_{kv}+N(r_0+c_{PwG}\,t_F)=q_s+N(r_0+c_{PwG}\,t_L).$$

Ebből

$$q_s=q_{kv}-Nc_{PwG}(t_L-t_F),$$

amelyben

$$q_{kv}=\alpha_{kv}(t_L-t_F)$$

az a konvekciós hőáram, amely az anyagátadást nem veszi figyelembe. Tehát

$$q_s=(\alpha_{kv}-Nc_{PwG})\,(t_L-t_F),$$

és

$$q_{kd}=k_{kd}(t_{kd}-t_F).$$

Az utóbbi kifejezéseket (2)-be helyettesítve és azt rendezve

$$\frac{dt_F}{d\tau}=\frac{F_{\acute{e}}}{G_{sz}\,c_{na}}\,(\alpha_{kv}\,t_L+k_{kd}\,t_{kd})+\frac{1}{c_{na}}\,(r_0+c_{PwG}\,t_L-\Phi)\,\frac{dX}{d\tau}-$$

$$-\left[\frac{F_{\acute{e}}}{G_{sz}\,c_{na}}\,(\alpha_{kv}+k_{kd})+\frac{c_w}{c_{na}}\,\frac{dX}{d\tau}\right]t_F. \tag{3}$$

Amint a fenti összefüggésből látható, sugárzó hőforrást nem vettünk figyelembe, amely egyszerű addiciós tagként jelentkeznék az egyenlet jobb oldalán az első és a harmadik tagban, valamint feltételeztük, hogy a szárítóközeg állapotjelzői a szárítás során nem változnak meg észrevehetően.

A fentieken kívül még a két fázis kapcsolatát jelképező anyagátadási sebességet is felírhatjuk:

$$N=\sigma(x_F-x_L)f, \tag{4}$$

ahol az f faktor:

$$f = 1;\ X \geq X_{kr};\qquad x_F = \psi(t_F),$$
$$0 < f < 1;\ X_e < X < X_{kr};\ x_F = x_{Fkr},$$
$$f = 0;\ X = X_e;\qquad x_F = x_{Fkr},$$

amely egyenlőtlenségekben az egyensúlyi nedvességtartalom a szorpciós izoterma ismerete alapján határozható meg.

A továbbiakban az f faktorra lineáris kapcsolatot tételezünk fel

$$f = aX + b, \tag{5}$$

ahol

$$a = \frac{1}{X_{kr} - X_e},$$

$$b = -\frac{X_e}{X_{kr} - X_e}.$$

Ebben az esetben

$$f = \frac{N}{N_{áll}},$$

ahol $N_{áll}$ az állandósult állapotú száradási sebesség. A szakaszos szárítási műveletben a csökkenő sebességű szakaszban szokás feltételezni a száradási sebesség lineáris csökkenését (az anyagnedvességtartalom függvényében), amely megfelel f fenti definíciójának.

Végül egyenleteinket összegezve az (1) és (4) felhasználásával:

$$\frac{dX}{d\tau} = -\frac{F_é}{G_{sz}}\,\sigma(x_F - x_L)f, \tag{6}$$

és

$$\frac{dt_F}{d\tau} = \frac{F_é}{G_{sz}\,c_{na}}(\alpha_{kv}\,t_L + k_{kd}\,t_{kd}) + \frac{1}{c_{na}}(r_0 + c_{PwG}\,t_L - \Phi)\,\frac{dX}{d\tau} -$$
$$-\left[\frac{F_é}{G_{sz}\,c_{na}}(\alpha_{kv} + k_{kd}) + \frac{c_w}{c_{na}}\,\frac{dX}{d\tau}\right]t_F, \tag{3}$$

valamint

$$x_F = \psi(t_F). \tag{7}$$

A továbbiakban FILONENKO [2] közelítésével dolgozunk, amely szerint a

$$0\ °C < t_F < 100\ °C,$$

tartományban

$$\log p_F = 0{,}622 + \frac{7{,}5\,t_F}{238 + t_F}, \tag{8}$$

és

$$x_F = \frac{M_w}{M_L}\,\frac{p_F}{p - p_F}. \tag{9}$$

b) *A peremfeltételek meghatározása*

A fenti egyenletek megoldásához meg kell adni a kezdeti feltételeket,

$$t_F = t_F(\tau = 0) = t_{F0},$$

$$X = X(\tau = 0) = X_0,$$

valamint a végső és a kritikus anyagnedvességtartalmat.

c) *A numerikus megoldás*

A meghatározott egyenletrendszer a megadott peremfeltételekkel numerikusan megoldható, és így az $X = X(\tau)$, $t_F = t_F(\tau)$, továbbá $N = \mathrm{N}(\tau)$, $x_F = x_F(\tau)$ függvények megadhatók. Célunk a szükséges szárítási idő meghatározása, ami azt jelenti, hogy az $X = X_v$ eléréséhez szükséges időt kell meghatároznunk. Az ismertetett méretezési módszert konkrét számpéldával illusztráljuk.

A számításokat Hewlett-Packard 9100 B típusú elektronikus számítógépen végeztük. A függvényértékek meghatározása $\Delta\tau = 0{,}1$ óránként történt, a kiiratás pedig a változás nagyságától függően (felfutási és lecsengési szakaszban sűrűbben). Három különböző esetet vizsgáltunk, amelyeknek jellegzetes függvényértékeit táblázatokban, illetve diagramokban közöljük.

A példa adatai

Közös jellemzők:

t_L = 120 °C
x_L = 0,04 kg nedvesség/kg száraz levegő
α_{kv} = 10 kcal/m² h °C
σ = 40 kg/m² h
G_{sz} = 1000 kg
$F_{\acute{e}}$ = 20 m²
c_{na} = 1 kcal/kg °C
c_{PwG} = 0,46 kcal/kg °C
Φ = 0
X_0 = 0,5 kg nedvesség/kg száraz anyag
X_v = 0,15 kg nedvesség/kg száraz anyag
a = 6,66 kg száraz anyag/kg nedvesség
b = − 0,333
r_0 = 597 kcal/kg
k_{kd} = 10 kcal/m² h °C
t_{kd} = 100 °C

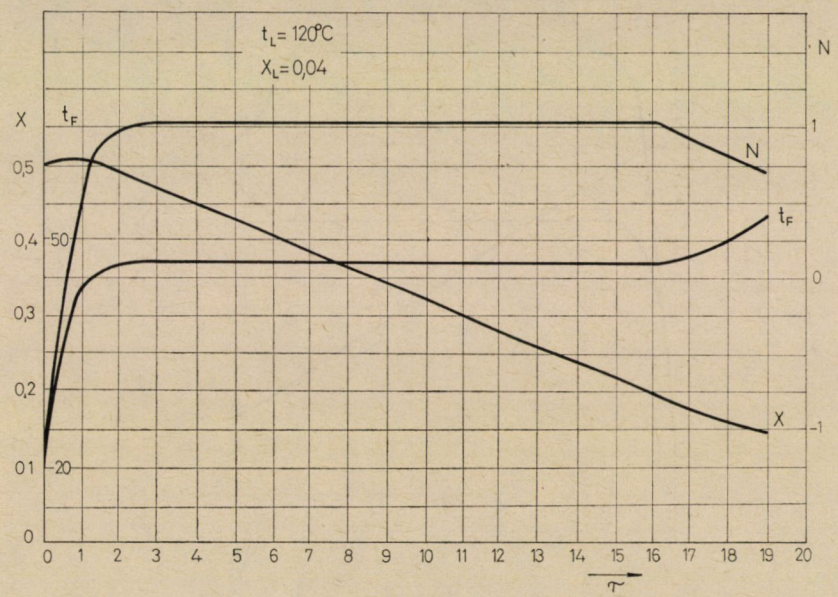
1. eset (I. táblázat, 2. ábra): csak konvekciós hőforrás, az anyag kezdeti hőmérséklete (az induló felületi hőmérséklet): $t_{F0} = 20$ °C.

2. eset (II. táblázat, 3. ábra): konvekciós és kondukciós hőforrás $t_{F0} = 20$ °C kezdeti hőmérséklettel.

3. eset (III. táblázat, 4. ábra): konvekciós és kondukciós hőforrás $t_{F0} = 70$ °C kezdeti hőmérséklettel.

I. táblázat

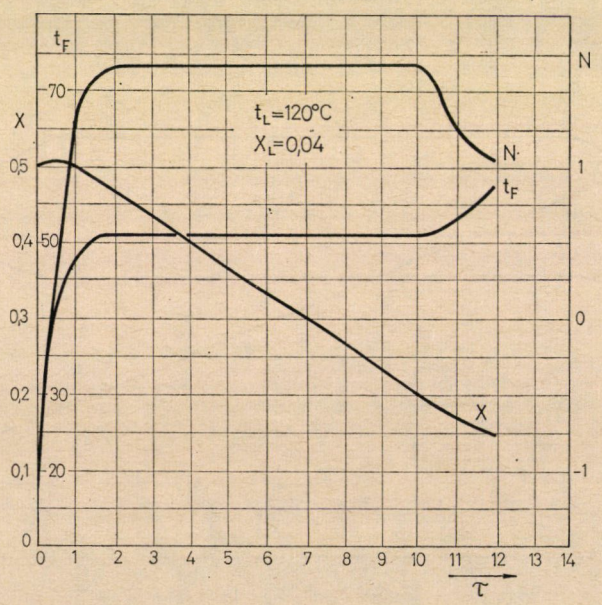
τ	x_F	N	t_F	X
0	0,013 353 565	−1,065 857 396	2,0 01	0,5
0,5	0,032 405 243	0,303 790 290	3,466 820 220 01	0,507 824 190
1,0	0,051 275 058	0,451 002 307	4,268 364 515 01	0,507 620 020
1,5	0,061 151 768	0,846 070 735	4,581 561 336 01	0,501 242 560
2,0	0,064 596 984	0,983 879 359	4,679 455 280 01	0,492 103 720
2,5	0,065 611 224	1,024 448 943	4,707 312 886 01	0,482 062 712
3,0	0,065 894 019	1,035 760 750	4,715 005 848 01	0,471 761 633
3,5	0,065 971 651	1,038 866 026	4,717 112 089 01	0,461 388 474
4,0	0,065 992 870	1,038 714 809	4,717 687 381 01	0,450 995 562
4,5	0,065 998 663	1,039 946 538	4,717 844 412 01	0,440 597 253
5,0	0,066 000 245	1,040 009 782	4,717 887 268 01	0,430 197 471
1,00 01	0,066 000 838	1,040 033 520	4,717 903 352 01	0,326 194 327
1,50 01	0,066 000 838	1,040 033 520	4,717 903 352 01	0,222 190 975
1,62 01	0,066 000 838	1,034 215 760	4,718 718 047 01	0,197 241 806
1,64 01	0,066 000 838	1,005 759 747	4,726 241 036 01	0,193 190 509
1,66 01	0,066 000 838	0,978 086 690	4,741 155 939 01	0,189 250 682
1,68 01	0,066 000 838	0,951 175 045	4,762 931 939 01	0,185 419 258
1,70 01	0,066 000 838	0,925 003 862	4,791 069 208 01	0,181 693 254
1,72 01	0,066 000 838	0,899 552 769	4,825 970 072 01	0,178 069 770
1,74 01	0,066 000 838	0,874 801 952	4,864 572 299 01	0,174 545 984
1,76 01	0,066 000 838	0,850 732 143	4,909 077 496 01	0,171 119 153
1,78 01	0,066 000 838	0,827 324 605	4,958 219 610 01	0,167 786 610
1,80 01	0,066 000 838	0,804 561 116	5,011 628 516 01	0,164 545 761
1,82 01	0,066 000 838	0,782 423 954	5,068 955 706 01	0,161 394 083
1,84 01	0,066 000 838	0,760 895 887	5,129 873 049 01	0,158 329 121
1,86 01	0,668 000 380	0,739 960 156	5,194 071 632 01	0,155 348 491
1,88 01	0,066 000 838	0,719 600 463	5,261 260 673 01	0,152 449 871
1,90 01	0,066 000 838	0,699 800 958	5,331 166 498 01	0,149 631 006



2. ábra

II. táblázat

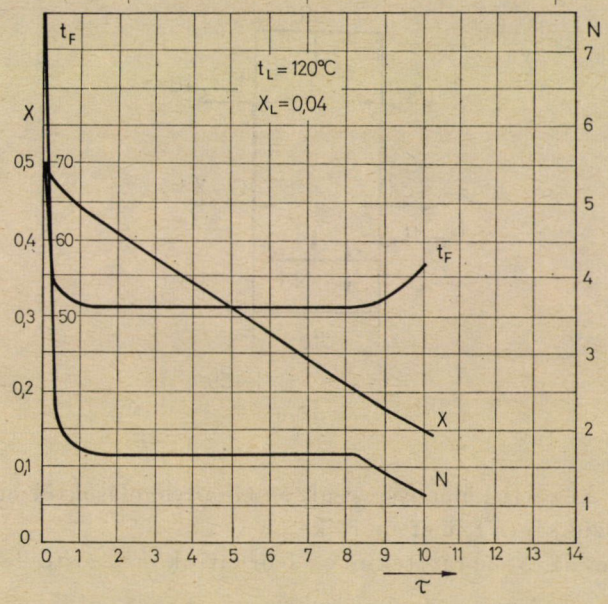
τ	x_F	N	t_F	X
0	0,013 353 565	−1,065 857 396	2,0 01	0,5
0,5	0,044 806 843	0,192 273 702	4,030 432 494 01	0,506 083 607
1,0	0,071 538 787	1,261 551 460	4,862 195 204 01	0,499 218 893
1,5	0,079 905 289	1,596 211 543	5,060 661 607 01	0,484 871 140
2,0	0,081 532 602	1,661 304 099	5,096 871 260 01	0,468 562 646
2,5	0,081 813 379	1,672 535 172	5,103 046 351 01	0,451 889 537
3,0	0,081 860 764	1,674 430 547	5,104 086 396 01	0,435 154 040
3,5	0,081 868 730	1,674 749 205	5,104 261 194 01	0,418 408 028
4,0	0,081 870 069	1,674 802 745	5,104 290 562 01	0,401 660 249
4,5	0,081 870 293	1,674 811 740	5,104 295 495 01	0,384 912 174
0,5 01	0,081 870 331	1,674 812 251	5,104 296 324 01	0,368 164 048
1,00 01	0,081 870 339	1,674 813 556	5,104 296 492 01	0,200 682 695
1,01 01	0,081 870 339	1,674 813 556	5,104 296 492 01	0,197 333 068
1,02 01	0,081 870 339	1,643 391 091	5,108 721 045 01	0,194 046 286
1,03 01	0,081 870 339	1,606 729 472	5,118 116 668 01	0,190 832 827
1,04 01	0,081 870 339	1,570 885 722	5,132 154 373 01	0,187 691 055
1,05 01	0,081 870 339	1,535 841 592	5,150 522 934 01	0,184 619 372
1,06 01	0,081 870 339	1,501 579 245	5,172 927 931 01	0,181 616 213
1,07 01	0,081 870 339	1,468 081 239	5,199 090 847 01	0,178 680 051
1,08 01	0,081 870 339	1,435 330 524	5,228 748 219 01	0,175 809 390
1,09 01	0,081 870 339	1,403 310 340	5,261 650 834 01	0,173 002 769
1,10 01	0,081 870 339	1,372 004 656	5,297 562 974 01	0,170 258 760
1,11 01	0,081 870 339	1,341 397 267	5,336 261 699 01	0,167 575 965
1,12 01	0,081 870 339	1,311 472 684	5,377 536 175 01	0,164 953 020
1,13 01	0,081 870 339	1,282 215 674	5,421 187 039 01	0,162 388 589
1,14 01	0,081 870 339	1,253 611 344	5,467 257 793 01	0,159 881 366
1,15 01	0,081 870 339	1,225 645 135	5,514 874 239 01	0,157 430 076
1,16 01	0,081 870 339	1,198 302 810	5,564 639 944 01	0,155 033 470
1,17 01	0,081 870 339	1,171 570 452	5,615 935 728 01	0,152 690 329
1,18 01	0,081 870 339	1,145.434 453	5,668 839 187 01	0,150 399 460
1,19 01	0,081 870 339	1,119 881 510	5,723 132 238 01	0,148 158 697



3. ábra

III. táblázat

τ	x_F	N	t_F	X
0	0,240 788 861	8,031 554 422	7,0 01	0,5
0,5	0,089 749 630	1,989 985 217	5,269 384 029 01	0,461 526 539
1,0	0,083 082 428	1,723 297 115	5,130 696 561 01	0,443 087 873
1,5	0,082 071 154	1,682 846 169	5,108 697 082 01	0,426 072 272
2.0	0,081 903 997	1,676 159 882	5,105 034 810 01	0,409 279 630
2,5	0,081 875 991	1,675 039 644	5,104 420 499 01	0,392 524 030
3,0	0,081 871 288	1,674 851 535	5,104 317 323 01	0,375 774 640
3,5	0,081 870 498	1,674 819 936	5,104 299 991 01	0,359 026 294
4,0	0,018 870 366	1,674 814 628	5,104 297 080 01	0,342 278 123
4,5	0,081 870 343	1,674 813 736	5,104 296 590 01	0,325 629 982
5,0	0,081 870 340	1,674 813 586	5,104 296 508 01	0,308 781 845
8,3	0,081 870 339	1,674 813 555	5,104 296 492 01	0,198 244 150
8,4	0,081 870 229	1,653 553 539	5,107 290 085 01	0,194 370 043
8,5	0,081 870 339	1,616 665 213	5,115 348 448 01	0,191 703 713
8,6	0,081 870 339	1,580 599 810	5,128 137 537 01	0,188 542 513
8,7	0,081 870 339	1,545 338 973	5,145 341 344 01	0,185 451 835
8,8	0,081 870 339	1,510 864 753	5,166 660 924 01	0,182 430 106
8,9	0,081 870 339	1,477 159 602	5,191 813 477 01	0,179 475 786
9,0	0,081 870 339	1,444 206 362	5,220 531 487 01	0,176 587 374
9,1	0,081 870 339	1,411 988 261	5,252 561 903 01	0,173 762 397
9,2	0,081 870 339	1,380 488 897	5,287 665 370 01	0,171 002 419
9,3	0,081 870 339	1,349 692 238	5,325 615 507 01	0,168 303 035
9,4	0,081 870 339	1,319 582 606	5 366 198 219 01	0 165 663 870
95	0 081 870 339	1 290 144 676	5 409 211 051 01	0 163 083 580
9 6	0 081 870 339	1.261 363 462	5,454 462 579 01	0,160 560 853
9,7	0,081 870 339	1,233 224 314	5,501 771 829 01	0,158 094 405
9,8	0,081 870 339	1,205 712 909	5,550 967 735 01	0,155 682 979
9,9	0,081 870 339	1,178 815 243	5,601 888 624 01	0,153 325 348
1,00 01	0,081 870 339	1,152 517 623	5,654 381 727 01	0,151 020 313
1,01 01	0,081 870 339	1,126 806 665	5,708 302 717 01	0,148 766 700



4. ábra

d) *Következtetések*

Az első és a második eset eredményeinek összehasonlításából kitűnik, hogy a kondukciós hőforrás jelentősen lecsökkentheti a szükséges szárítási időt.

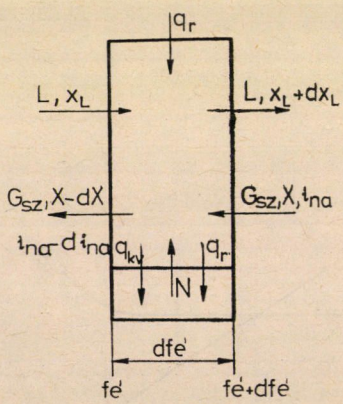
A második és a harmadik esetből kitűnik, hogy a nedves anyag belépő hőmérséklete adott körülmények között kissé befolyásolja a száradás idejét (20% eltérés).

2. Folyamatos szárítási feladat

A folyamatos szárítás esetén, szemben a szakaszos szárítással, a szárító levegő be- és kilépő állapotjelzői jelentősen eltérnek egymástól, a levegő telítődésének mértéke nem hanyagolható el. Ebből következően a szárító érintkezési felületének meghatározásánál alapvető fontosságú a levegő főtömegének, illetve a száradó anyag felületével érintkező levegő hőfokának, valamint nedvességtartalmának ismerete.

a) *A matematikai modell*

Azt az általános esetet vizsgáljuk, amikor sugárzó és kondukciós hőforrás is van; ebből az egyszerűbb esetek értelemszerűen adódnak. Legyen továbbá a szárító levegő és a nedves anyag mozgása ellentétes irányú, bár az egyen-



5. ábra

vagy ellenáram közötti különbség csak az elhanyagolásoktól mentes esetben befolyásolja a szükséges felület mértékét.

Ezek után az 5. ábrát tekintve felírhatjuk a szárító levegő entalpia mérlegét

$$Li_L + Ni_w\, df_é = L(i_L + di_L) + \alpha_{kv}(t_L - t_F)\, df_é,$$

azaz

$$Ni_w\, df_é = Ldi_L + \alpha_{kv}(t_L - t_F)\, df_é.$$

A szárítóközeg entalpiájának teljes megváltozása

$$di_L(x_L, t_L) = c_{nL}\, dt_L + (r_0 + c_{PwG} t_L)\, dx_L,$$

így az entalpia mérleg, figyelembe véve, hogy a száradó anyag felületén a hőmérséklet t_F,

$$N(r_0 + c_{PwG}\, t_F)\, df_é = Lc_{nL}\, dt_L + \\ + L(r_0 + c_{PwG}\, t_L)\, dx_L + \alpha_{kv}\,(t_L - t_F)\, df_é. \tag{10}$$

Irjuk fel a nedvesség anyagmérlegét a szárító levegőben

$$Lx_L + Ndf_é = L(x_L + dx_L),$$

azaz

$$Ndf_é = Ldx_L.$$

Ezt behelyettesítve (10)-be

$$Ldx_L(r_0 + c_{PwG}\, t_F) = Lc_{nL}\, dt_L + \\ + L(r_0 + c_{PwG}\, t_L)\, dx_L + \alpha_{kv}\,(t_L - t_F)\, df_é,$$

azaz

$$- Lc_{nL}\, dt_L = \alpha_{kv}(t_L - t_F)\, df_é + Ldx_L\, c_{PwG}\,(t_L - t_F). \tag{11}$$

Az első esetben a szokásos elhanyagolásokkal élünk, így a túlhevítési hőt elhanyagolva

$$-Lc_{nL}\, dt_L = \alpha_{kv}(t_L - t_F)\, df_é,$$

azaz

$$-\frac{dt_L}{df_é} = \frac{\alpha_{kv}}{c_{nL} L}\,(t_L - t_F). \tag{12}$$

További összefüggéshez juthatunk, ha felírjuk a száradó anyag entalpia mérlegét:

$$G_{sz}\, i_{na} + [\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) + \\ + k_{kd}(t_{kd} - t_F)]\, df_é = G_{sz}(i_{na} \mp di_{na}) + N(r_0 + c_{PwG}\, t_F)\, df_é.$$

Az előjel pozitív vagy negatív aszerint, hogy egyen- vagy ellenáramról van szó, így

$$[\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) + k_{kd}(t_{kd} - t_F)]\, df_é = \mp G_{sz}\, di_{na} + N(r_0 + c_{PwG}\, t_F)\, df_é. \tag{13}$$

Egységnyi tömegű száraz anyagot tartalmazó nedves anyag entalpiája, elhanyagolva az adszorpciós hőt

$$i_{na} = c_{sz}\, t_{na} + X c_w\, t_{na} = c_{na}\, t_{na}\,,$$

az entalpia teljes megváltozása pedig

$$di_{na} = (c_{sz} + X c_w)\, dt_{na} + c_w\, t_{na}\, dX\,.$$

Ezzel a (13) egyenlet:

$$\begin{aligned}&[\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) + \\ &+ k_{kd}(t_{kd} - t_F)]\, df_{\acute{e}} = \mp G_{sz}[(c_{sz} + X c_w)\, dt_{na} + \\ &+ c_w\, t_{na}\, dX] + N(r_0 + c_{PwG}\, t_F)\, df_{\acute{e}}\,.\end{aligned} \tag{14}$$

A száradó anyag nedvességtartalmának anyagmérlege szerint

$$G_{sz}\, X = G_{sz}(X \mp dX) + N df_{\acute{e}}\,,$$

azaz

$$\pm G_{sz}\, dX = N df_{\acute{e}} = L dx_L\,. \tag{15}$$

Ezt behelyettesítve (14)-be és feltételezve, hogy $t_{na} \approx t_F$ adódik:

$$\begin{aligned}&[\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) + k_{kd}(t_{kd} - t_r)]\, df_{\acute{e}} = \\ &= \mp G_{sz}\, c_{na}\, dt_F \mp G_{sz}\, c_w\, t_F\, dX \pm G_{sz}\, dX(r_0 + c_{PwG}\, t_F) = \\ &= \mp G_{sz}\, c_{na}\, dt_F \pm G_{sz}\, dX(r_0 + c_{PwG}\, t_F - c_w\, t_F),\end{aligned}$$

azaz

$$[\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) + k_{kd}(t_{kd} - t_F)]\, df_{\acute{e}} = \mp G_{sz}\, c_{na}\, dt_F + L dx_L\, r_F\,. \tag{16}$$

Ebből, ha elhanyagoljuk a nedves anyag felmelegítéséhez szükséges hőmennyiséget,

$$[\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) + k_{kd}(t_{kd} - t_r)]\, df_{\acute{e}} = L dx_L\, r_F\,,$$

viszont a (12) alapján:

$$df_{\acute{e}} = -\frac{c_{nL}\, L}{\alpha_{kv}(t_L - t_F)}\, dt_L\,.$$

Ezzel kapjuk a második összefüggésünket:

$$-\frac{dx_L}{dt_L} = \frac{c_{nL}}{r_F}\left[1 + \frac{\alpha_r}{\alpha_{kv}}\,\frac{t_r - t_F}{t_L - t_F} + \frac{k_{kd}}{\alpha_{kv}}\,\frac{t_{kd} - t_F}{t_L - t_F}\right]. \tag{17}$$

A harmadik összefüggésünket is a (16) egyenlet felhasználásával nyerhetjük, ha figyelembe vesszük, hogy a levegőbe párolgó nedvességmennyiség kifejezhető a párolgási tényezővel és a levegő főtömegének, valamint a száradó anyag felületével érintkező részének nedvességkülönbségével is, vagyis

$$N = -\sigma(x_L - x_F).$$

Ezzel, felhasználva a (15)-t is, a (16) egyenletből a

$$[\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) + k_{kd}(t_{kd} - t_F)]\, df_{\acute{e}} = \\ = \pm G_{sz}\, c_{na}\, dt_F + \sigma(x_F - x_L)\, r_F\, df_{\acute{e}}, \tag{18}$$

összefüggést kapjuk. Ismét elhanyagolva a nedves anyag felmelegítéséhez szükséges hőmennyiséget,

$$\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) + k_{kd}(t_{kd} - t_F) = \sigma(x_F - x_L)\, r_F. \tag{19}$$

Tudjuk továbbá, hogy a száradó anyag felületén a levegő telített, így a $\varphi = 1$ görbe egyenlete adja a negyedik összefüggést:

$$x_F = \psi(t_F). \tag{20}$$

A (20) kapcsolat szakaszonként általában lineárisan jól közelíthető. Mivel az esetek többségében az x_F nem sokat változik a szárítás folyamán (különösen akkor, ha az anyag felmelegítéséhez szükséges hőmennyiséget nem vesszük figyelembe), ez a közelítés megfelelőnek mondható. Nagyobb változás esetében magasabb fokszámú regressziós polinomot, illetve FILONENKO [2] empirikus összefüggését használhatjuk, amely utóbbi $0 < t < 100$ °C között jól alkalmazható. A példában az egyszerűség kedvéért lineáris összefüggést alkalmaztunk.

Foglaljuk össze ezek után a hagyományos elhanyagolások esetére adódó egyenleteinket. Ekkor a matematikai modellt a következő egyenletrendszer alkotja:

$$\frac{dt_L}{df_{\acute{e}}} = \frac{\alpha_{kv}}{c_{nL} L}(t_L - t_F), \tag{12}$$

$$-\frac{dx_L}{dt_L} = \frac{c_{nL}}{r_F}\left[1 + \frac{\alpha_r}{\alpha_{kv}}\,\frac{t_r - t_F}{t_L - t_F} + \frac{k_{kd}}{\alpha_{kv}}\,\frac{t_{kd} - t_F}{t_L - t_F}\right], \tag{17}$$

$$x_F - x_L = \frac{1}{\sigma r_F}[\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) + k_{kd}(t_{kd} - t_F)], \tag{19}$$

$$x_F = a + bt_F. \tag{20}$$

Vizsgáljuk azt az esetet, amikor csak a nedves anyag felmelegítéséhez szükséges hőmennyiséget hanyagoljuk el. Ekkor a (11) egyenlet a következő formában írható:

$$\frac{dt_L}{df_é} = \left[\frac{\alpha_{kv}}{Lc_{nL}} + \frac{c_{PwG}}{c_{nL}} \frac{dx_L}{df_é}\right](t_L - t_F), \tag{21}$$

a (16) egyenlet pedig az előbbi elhanyagolással így írható:

$$\frac{dx_L}{df_é} = \frac{1}{Lr_F}[\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) + k_{kd}(t_{kd} - t_F)]. \tag{22}$$

A további két egyenlet, a (19) és (20) engyenlet, változatlan.

A matematikai modellt a nedves anyag felmelegítéséhez szükséges hőmennyiség elhanyagolása esetében tehát a következő egyenletek alkotják:

$$-\frac{dt_L}{df_é} = \left[\frac{\alpha_{kv}}{Lc_{nL}} + \frac{c_{PwG}}{c_{nL}} \frac{dx_L}{df_é}\right](t_L - t_r), \tag{21}$$

$$\frac{dx_L}{df_é} = \frac{1}{Lr_F}[\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) + k_{kd}(t_{kd} - t_F)], \tag{22}$$

$$x_F - x_L = \frac{1}{\sigma r_F}[\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) + k_{kd}(t_{kd} - t_F)], \tag{19}$$

$$x_F = a + bt_F. \tag{20}$$

A harmadik eset, amikor nem alkalmazunk elhanyagolást. Ennél az esetnél a (11), s így a (21) egyenlet is változatlan. A (16) egyenlet pedig a következő alakban írható:

$$\frac{dx_L}{df_é} = \frac{1}{Lr_F}[\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) + k_{kd}(t_{kd} - t_F)] \pm \frac{G_{sz}\, c_{na}}{Lr_F} \frac{dt_F}{df_é}. \tag{23}$$

A (18) egyenlet alakja pedig

$$\sigma(x_F - x_L)\, r_F = [\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) + k_{kd}(t_{kd} - t_F)] \pm G_{sz}\, c_{na} \frac{dt_F}{df_é}. \tag{24}$$

A (20) egyenlet ismét változatlan. Az egyenletrendszer tehát:

$$-\frac{dt_L}{df_{\dot{e}}} = \left[\frac{\alpha_{kv}}{Lc_{nL}} + \frac{c_{PwG}}{c_{nL}} \frac{dx_L}{df_{\dot{e}}}\right](t_L - t_F), \tag{21}$$

$$\frac{dx_L}{df_{\dot{e}}} = \frac{1}{Lr_F}[\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) +$$

$$+ k_{kd}(t_{kd} - t_F)] \pm \frac{G_{sz} c_{na}}{Lr_F} \frac{dt_F}{df_{\dot{e}}}, \tag{23}$$

$$\sigma(x_F - x_L) r_F = [\alpha_{kv}(t_L - t_F) + \alpha_r(t_r - t_F) +$$

$$+ k_{kd}(t_{kd} - t_F)] \pm G_{sz} c_{na} \frac{dt_F}{df_{\dot{e}}}, \tag{24}$$

$$x_F = a + bt_F. \tag{20}$$

Az egyenletrendszerek megoldásához szükségesek a peremfeltételek.

b) *A peremfeltételek meghatározása*

A kezdeti feltételek a belépő levegő állapotjelzői $x_L(f_{\dot{e}} = 0) = x_{L0}$ és a $t_L(f_{\dot{e}} = 0) = t_{L0}$ alapján a (19) és (20) egyenletek segítségével meghatározhatók, $t_F(f_{\dot{e}} = 0) = t_{F0}$ és $x_F(f_{\dot{e}} = 0) = x_{F0}$. Ezt még akkor is megtehetjük, ha a nedves anyag felmelegítéséhez szükséges hőmennyiséget nem hanyagoljuk el.

A további peremfeltételt, az $x_L(f_{\dot{e}} = F_{\dot{e}}) = x_{Lv}$ összefüggést, a nedvességre felírt anyagmérleg alapján lehet meghatározni:

$$G_{sz}(X_0 - X_v) = L(x_{Lv} - x_{L0}). \tag{25}$$

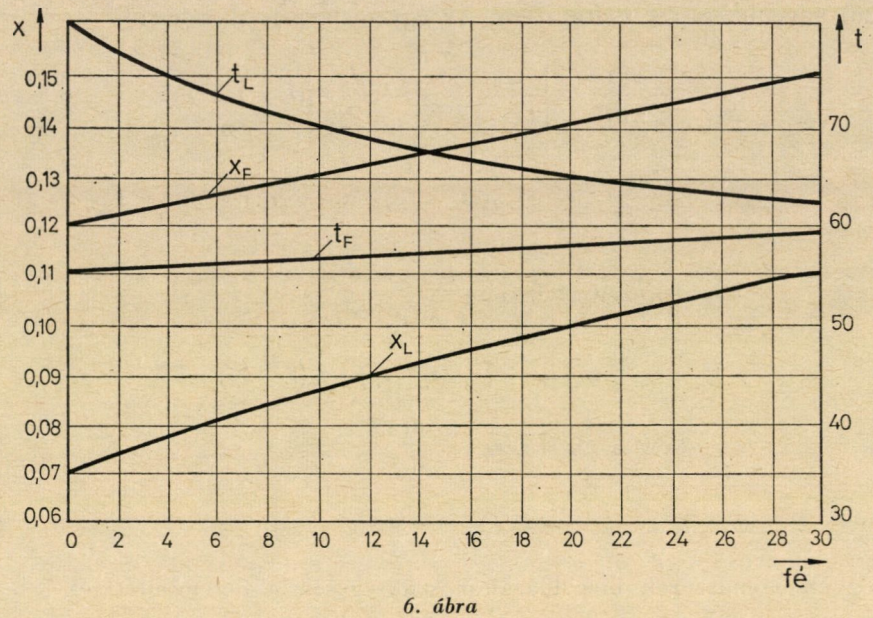
Ebből

$$x_{Lv} = \frac{G_{sz}}{L}(X_0 - X_v) + x_{L0}.$$

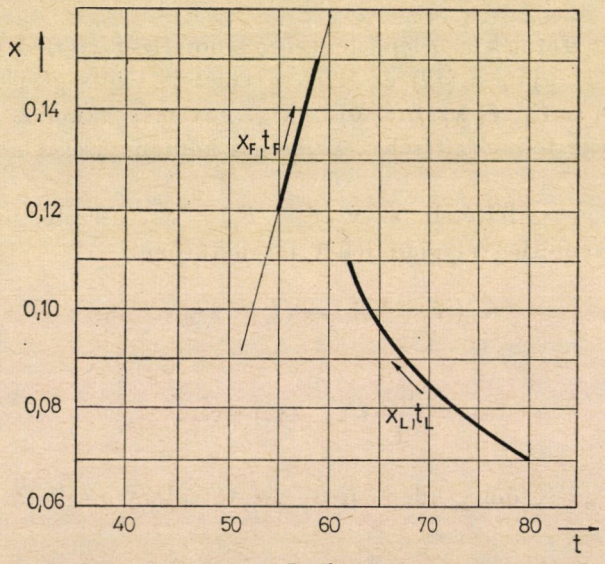
Igy tehát a levegő főtömeg kilépő nedvességtartalma meghatározható.

c) *A numerikus megoldás*

A szereplő egyenletrendszerek az említett kiinduló feltételek mellett meghatározzák az $x_L(f_{\dot{e}})$, $t_L(f_{\dot{e}})$, $x_F(f_{\dot{e}})$ és a $t_F(f_{\dot{e}})$ függvényeket. A szükséges érintkezési felület meghatározása annyit jelent, hogy meghatározzuk az $f_{\dot{e}} = F_{\dot{e}}$ független változónak azt az értékét, amelynél $x_L = x_{Lv}$.



6. ábra



7. ábra

Ellenáram esetében, mivel a $t_F(F_{\dot{e}}) = t_{Fv}$ áll rendelkezésre a $t_F(0) = t_{F0}$ helyett, felvesszük $t_F(0)$ értékét; ehhez $x_F(0)$ adódik a (20) alapján. Így minden $f_{\dot{e}} = 0$ helyen vett érték rendelkezésre áll, meghatározható $F_{\dot{e}}$ úgy, hogy

az $x_L(F_{\dot{e}}) = x_{Lv}$ feltétel teljesüljön. Ekkor azonban általában $t_F(F_{\dot{e}}) = t_{Fv}$. Úgy kell tehát $t_F(0)$ értékét felvenni, hogy a $t_F(F_{\dot{e}}) = t_{Fv}$ is teljesedjék. Az lesz tehát a szükséges érintkezési felület, amelynél mindkét feltétel egyidejűleg teljesül.

IV. táblázat

$f_{\dot{e}}$	x_F	x_L	t_F	t_L
0	0,120 120 379	0,07	5,508 056 872 01	8,0 01
1,0	0,121 074 596	0,071 693 431	5,520 449 295 01	7,866 587 724 01
2,0	0,122 037 916	0,073 352 605	5,532 959 946 01	7,741 002 032 01
3,0	0.123 009 772	0,074 979 249	5,545 581 458 01	7,622 829 120 01
4,0	0,123 989 628	0,076 574 996	5,558 306 853 01	7,511 677 009 01
5.0	0,124 976 973	0,078 141 395	5,571 129 524 01	7,407 174 383 01
6,0	0,125 971 327	0,079 679 913	5,584 043 213 01	7,308 969 506 01
7,0	0,126 972 234	0,081 191 939	5,597 041 995 01	7,216 729 188 01
8,0	0.127 979 260	0,082 678 789	5,610 120 257 01	7,130 137 808 01
9,0	0,128 991 997	0,084 141 711	5,623 272 685 01	7,048 896 386 01
1,00 01	0,130 010 057	0,085 581 887	5,636 494 246 01	6,572 721 706 01
1,10 01	0,131 033 073	0,087 000 435	5,649 780 175 01	6,901 345 487 01
1,20 01	0,132 060 699	0,088 398 416	5,663 125 959 01	6,834 513 594 01
1,30 01	0.133 092 604	0,089 776 835	5,676 527 325 01	6,771 985 290 01
1,40 01	0.134 128 477	0,091 136 655	5,689 980 226 01	6,713 532 535 01
1,50 01	0,135 168 024	0,092 478 743	5,703 480 832 01	6,658 939 311 01
1,60 01	0,136 210 965	0,093 803 989	5,717 025 515 01	6,608 000 993 01
1,70 01	0,137 257 035	0,095 113 189	5,730 610 840 01	6,560 523 743 01
1,80 01	0.138 305 984	0,096 407 111	5,744 233 556 01	6,516 323 947 01
1.90 01	0,139 357 575	0,097 686 481	5,757 890 582 01	6,475 227 672 01
1,00 01	0,140 411 583	0,098 951 987	5,771 579 005 01	6,437 070 156 01
2,10 01	0,141 467 797	0,100 204 283	5,785 296 065 01	6,401 695 328 01
2,20 01	0,142 526 015	0,101 443 985	5,799 039 149 01	6,368 955 344 01
2,30 01	0,143 586 045	0,102 671 679	5,812 805 784 01	6,338 710 157 01
2,40 01	0.144 647 709	0,103 887 920	5,826 593 628 01	6,310 827 108 01
2,50 01	0,145 710 836	0,105 093 233	5,840 400 467 01	6,285 180 529 01
2,60 01	0,146 775 264	0,106 288 116	5,854 224 201 01	6,261 651 385 01
2,70 01	0,147 840 839	0,107 472 042	5,868 062 846 01	6,240 126 912 01
2,80 01	0,148 907 418	0,108 648 456	5,881 914 522 01	6,220 500 299 01
2,84 01		0,109 116 055		

Ez a módszer értelemszerűen csak akkor alkalmazható, ha az egész szárítóban növekszik a levegő nedvességtartalma. Ugyanis, mint a numerikus példából kitűnik, alacsony belépő hőmérséklet esetében az $x_L(f_{\dot{e}})$ függvénynek az $x_L = x_F$ helyen maximuma van.

Ebben az esetben a belépő levegő nedvességtartalmát vagy hőfokát kell úgy megváltoztatni, hogy az x_{Lv} a kívánt értékű legyen.

A számításokat Hewlett-Packard 9100 B típusú elektronikus asztali számítógépen végeztük.

Öt különböző esetet vizsgáltunk, amelyek jellegzetes függvényértékeit táblázatokban, illetve diagramokban közöljük.

A példa adatai

az $50 \leqq t_F \leqq 70$ °C tartományban felhasznált regressziós egyenes:

$x_F = -0{,}304 + 7{,}7 \cdot 10^{-3}\, t_F$
$\sigma = 46{,}2$ kg/m² h
$\alpha_{kv} = 11{,}6$ kcal/m² h °C
$\alpha_r = 3{,}58$ kcal/m² h °C
$k_{kd} = 2$ kcal/m² h °C
$G_{sz} = 428$ kg/h
$L = 8420$ kg/h
$r_F = 593$ kcal/kg
$c_{na} = 1$ kcal/kg °C
$c_{PwG} = 0{,}46$ kcal/kg °C
$c_{nL} = 0{,}25$ kcal/kg °C
$t_{kd} = 80$ °C
$t_r = 200$ °C
$t_{L0} = 80$ °C
$x_{L0} = 7 \cdot 10^{-2}$ kg nedv./kg sz. lev.
$X_0 = 0{,}79$ kg nedv./kg sz. anyag
$X_k = 0{,}1$ kg nedv./kg sz. anyag

V. táblázat

f_i	x_F	x_L	t_F	t_L
0	0,120 120 373	0,07	5,508 056 872 01	8.0 01
1,0	0,121 208 707	0,071 194 057	5,522 191 003 01	7.980 934 509 01
2,0	0,122 296 160	0,072 385 770	5,536 137 767 01	7,962 134 141 01
3,0	0,123 382 732	0,073 575 146	5,550 425 089 01	7,943 596 458 01
4,0	0,124 468 417	0,074 762 193	5,564 524 894 01	7.925 319 045 01
5,0	0,124 553 209	0,075 946 919	5,578 613 107 01	7,907 299 513 01
6.0	0,126 637 104	0,077 129 332	5,592 689 657 01	7,889 535 493 01
7.0	0,127 720 094	0,078 309 438	5,606 754 472 01	7,872 024 640 01
8,0	0,128 802 176	0,079 487 245	5,620 807 480 01	7.854 764 631 01
9,0	0,125 883 343	0,080 662 761	5,634 848 613 01	7.837 753 164 01
1,00 01	0,130 963 591	0,081 835 992	5,648 877 802 01	7,820 987 960 01
1,10 01	0,132 042 913	0,083 006 947	5,662 894 980 01	7,804 466 761 01
1,20 01	0,133 121 306	0,084 175 633	5,676 900 079 01	7,788 187 329 01
1,30 01	0,134 198 764	0,085 342 055	5.690 893 034 01	7.772 147 451 01
1,40 01	0,135 275 281	0,086 506 223	5,704 873 781 01	7,756 344 931 01
1.50 01	0,136 350 854	0,087 668 143	5,718 842 255 01	7,740 777 595 01
1.60 01	0,137 425 476	0,088 827 822	5,732 798 394 01	7.725 443 289 01
1,70 01	0,138 499 144	0,089 985 267	5,746 742 135 01	7.710 339 881 01
1.80 01	0,139 571 853	0,091 140 485	5,760 673 419 01	7.695 465 257 01
1,90 01	0,140 643 598	0,092 293 483	5,774 592 184 01	7,680 817 323 01
2,00 01	0,141 714 375	0,093 444 268	5,788 498 372 01	7.666 394 007 01
2,10 01	0,142 784 178	0,094 592 848	5,802 391 923 01	5,652 193 253 01
2,20 01	0,143 853 004	0.095 739 228	5,816 272 782 01	7.638 213 026 01
2,30 01	0,144 920 849	0,096 883 415	5,830 140 891 01	7,624 451 310 01
2,40 01	0.145 987 707	0,098 025 417	5,843 996 193 01	7,610 906 107 01
2,50 01	0,147 053 575	0,099 165 240	5,857 838 636 01	7,597 575 440 01
2,60 01	0,148 118 449	0,100 302 890	5,871 668 163 01	7,584 457 347 01
2,70 01	0,149 182 324	0,101 438 376	5,885 484 722 01	7,571 549 887 01
2,80 01	0,150 245 196	0,102 571 702	5,899 288 261 01	7,558 851 135 01
2,90 01	0,151 307 062	0,103 702 876	5,913 078 727 01	7,546 359 185 01
3,00 01	0,152 367 917	0,104 831 904	5,526 856 071 01	7,534 072 150 01
3.10 01	0,153 427 759	0,105 958 792	5,940 620 241 01	7,521 988 157 01
3,20 01	0,154 486 582	0,107 083 548	5,954 371 188 01	7,510 105 354 01
3,30 01	0,155 544 363	0,108 206 177	5,968 108 865 01	7.498 421 903 01
3,38 01		0,109 102 754		

1. eset (IV. táblázat, 6., 7. ábra): a konvekciós, kondukciós és sugárzó hőforrás mellett a levegőben levő nedvesség túlhevítéséhez és a nedves anyag felmelegítéséhez szükséges hőmennyiségtől eltekintettünk.

2. eset (V. táblázat, 8., 9. ábra): az előbbi hőforrások mellett csak a nedves anyag felmelegítését hanyagoltuk el.

3. eset (VI. táblázat, 10., 11. ábra): az előbbi hőforrások mellett elhanyagolás mentesen egyenáram esetén $t_F(0) = t_{F0} = 60$ °C belépő nedves anyag hőfoknál.

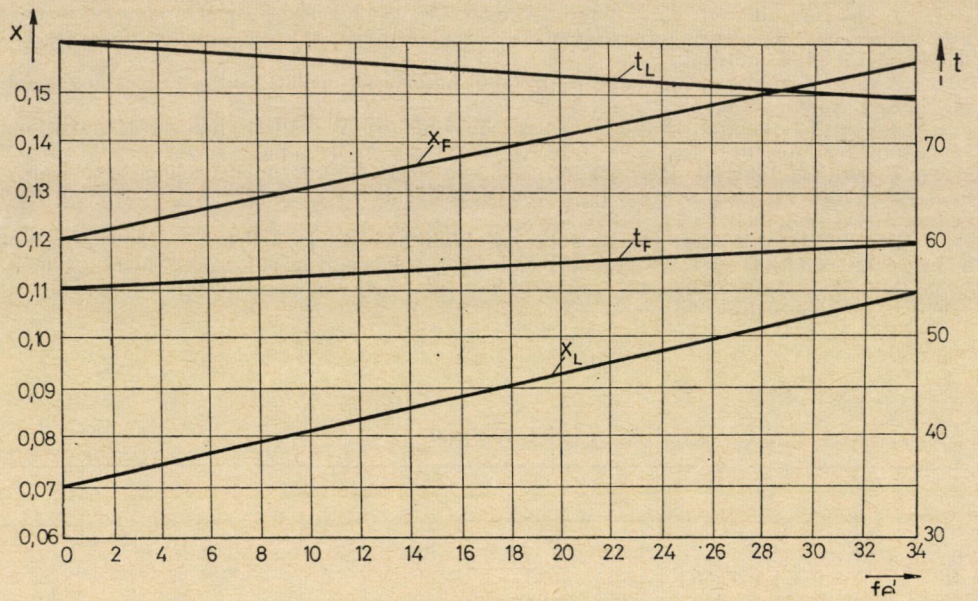
4. eset (VII. táblázat, 12., 13. ábra): csak konvekciós hőforrás mellett elhanyagolás mentesen egyenáram esetében $t_L(0) = t_{L0} = 200$ °C belépő hőfok és $t_F(0) = t_{F0} = 30$ °C belépő nedves anyag hőfoknál és $G_{sz} = 842$ kg/h.

5. eset (VIII. táblázat. 14., 15. ábra): az előbbi hőforrások mellett $t_r = 280$ °C sugárzó hőforráshőmérséklet és $t_F(F_é) = t_{Fv} = 51$ °C belépő nedves anyag hőfoknál ellenáram esetén.

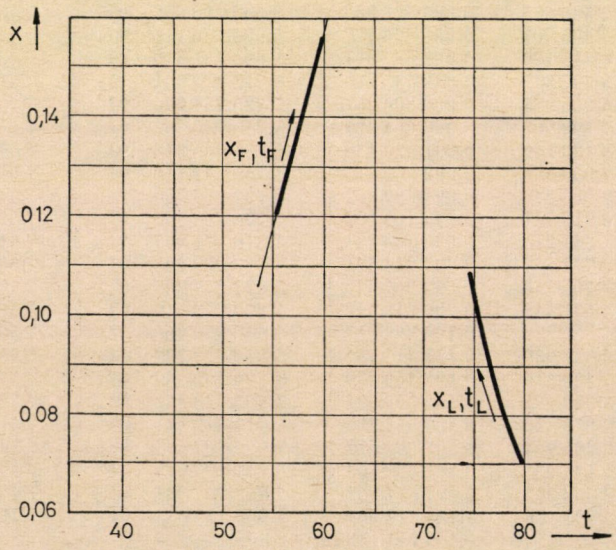
A 3., 4. és 5. esetekben az $x_F = \psi(t_F)$ kapcsolat nem lineáris, hanem a (8) egyenlettel való leírását használtuk fel.

VI. táblázat

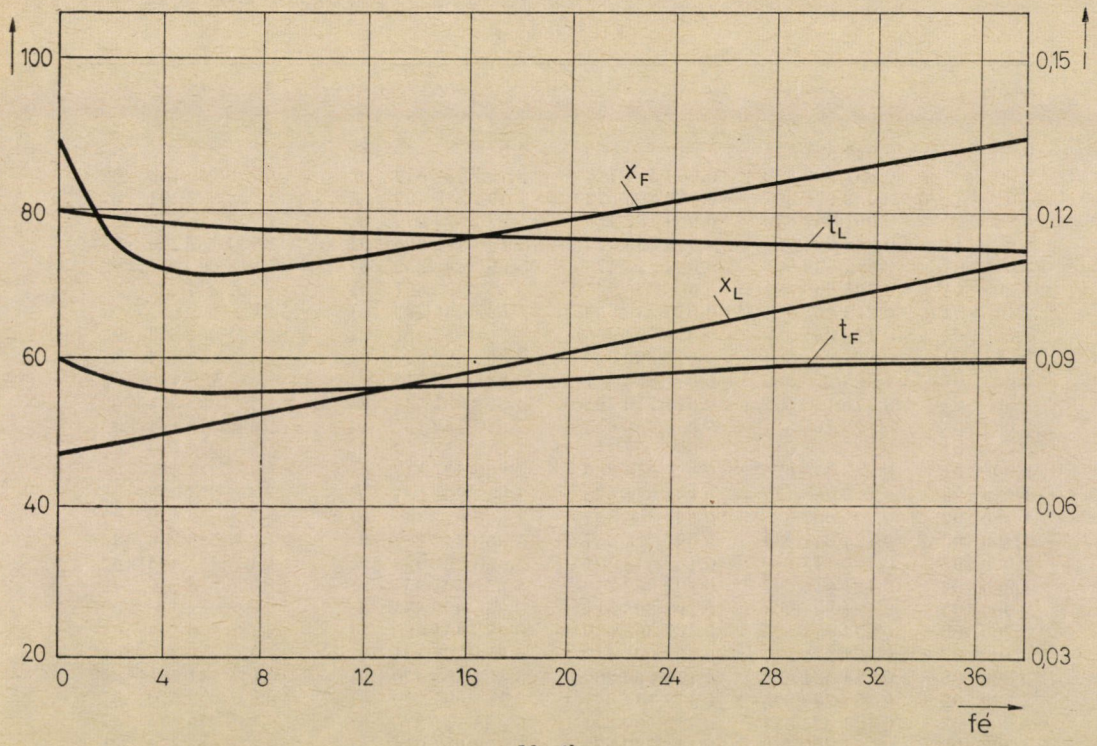
$f_é$	x_F	x_L	t_F	t_L
0	0.1335	0,07	6.0 01	8,0 01
1.0	0,121 400 066	0,071 234 839	5,803 905 572 01	7,982 717 297 01
2,0	0.114 435 460	0.072 405 988	5,698 449 008 01	7,966 690 606 01
3,0	0.110 617 622	0.073 546 596	5,637 782 333 01	7,949 285 416 01
4,0	0.108 583 730	0.074 667 932	5,604 576 288 01	7,931 736 247 01
5,0	0,107 623 554	0,075 776 477	5,588 774 422 01	7,914 187 244 01
6,0	0,107 333 673	0,076 876 166	5,583 848 884 01	7,896 728 810 01
7,0	0.107 471 646	0,077 969 478	5,586 148 762 01	7,879 418 034 01
8,0	0,107 886 325	0,079 058 005	5,593 042 886 01	7,862 290 844 01
9,0	0.108 481 249	0,080 142 786	5,602 886 276 01	7,845 369 528 01
1,00 01	0,109 193 967	0,081 224 505	5,614 605 922 01	7,828 667 529 01
1,10 01	0.109 983 714	0.082 303 618	5.627 500 732 01	7,812 192 522 01
1.20 01	0,110 823 769	0,083 380 428	5.641 112 847 01	7,795 948 434 01
1,30 01	0,111 696 596	0,084 455 138	5,655 143 890 01	7,779 936 756 01
1,40 01	0,112 590 687	0.085 527 889	5,669 400 072 01	7,764 157 404 01
1,50 01	0.113 498 506	0.086 598 777	5,683 756 116 01	7,748 609 288 01
1,60 01	0,114 415 129	0,087 667 871	5,698 131 519 01	7,733 290 674 01
1,70 01	0,115 337 347	0,088 735 219	5,712 474 961 01	7,718 994 434 01
1,80 01	0,116 263 075	0,089 800 861	5,726 754 076 01	7,703 333 193 01
1.90 01	0,117 190 965	0,090 864 825	5,740 948 762 01	7,688 689 437 01
2,00 01	0,118 120 146	0.091 928 136	5,755 046 818 01	7,674 265 576 01
2.10 01	0,119 050 060	0,092 987 815	5,769 041 114 01	7,660 058 984 01
2,20 01	0.119 980 348	0,094 460 882	5,782 927 750 01	7,646 067 031 01
2,30 01	0,120 910 781	0,095 104 352	5,796 704 880 01	7,632 287 091 01
2,40 01	0,121 841 214	0.096 160 244	5,810 371 947 01	7,618 716 561 01
2,50 01	0.122 771 554	0.097 214 571	5,823 929 200 01	7,605 352 863 01
2,60 01	0,123 701 743	0,098 267 349	5,837 377 385 01	7,592 193 448 01
2,70 01	0,124 631 742	0,099 318 592	5.850 717 540 01	7,579 235 799 01
2,80 01	0,125 561 529	0,100 368 317	5,663 950 886 01	7,566 477 432 01
2,90 01	0,126 491 089	0.101 416 534	5,877 078 738 01	7,553 915 895 01
3,00 01	0.127 420 412	0,102 463 259	5,890 102 459 01	7,541 548 771 01
3,10 01	0,128 349 491	0,103 508 505	5,903 023 433 01	7,529 373 675 01
3,20 01	0,129 278 323	0,104 552 285	5,915 843 044 01	7,517 388 255 01
3,30 01	0,130 206 904	0,105 594 612	5.928 562 664 01	7,505 590 191 01
3,40 01	0,131 135 233	0.106 635 500	5,941 183 649 01	7,493 977 195 01
3,50 01	0,132 063 307	0,107 674 962	5,953 707 334 01	7,482 547 011 01
3,60 01	0,132 991 126	0,108 713 009	5,966 135 033 01	7,471 297.414 01
3,63 01		0,109 024 149		


x
t
t_L
x_F
t_F
x_L
0,15
0,14
0,13
0,12
0,11
0,10
0,09
0,08
0,07
0,06
70
60
50
40
30
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34
fdi

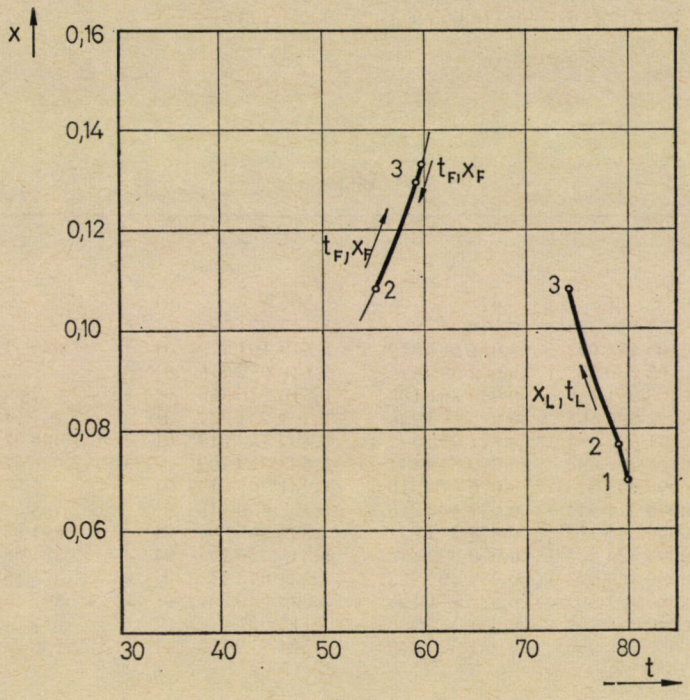
8. ábra


x
x_F, t_F
x_L, t_L
0,14
0 12
0,10
0 08
0,06
40 50 60 70 80
t

9. ábra



10. ábra



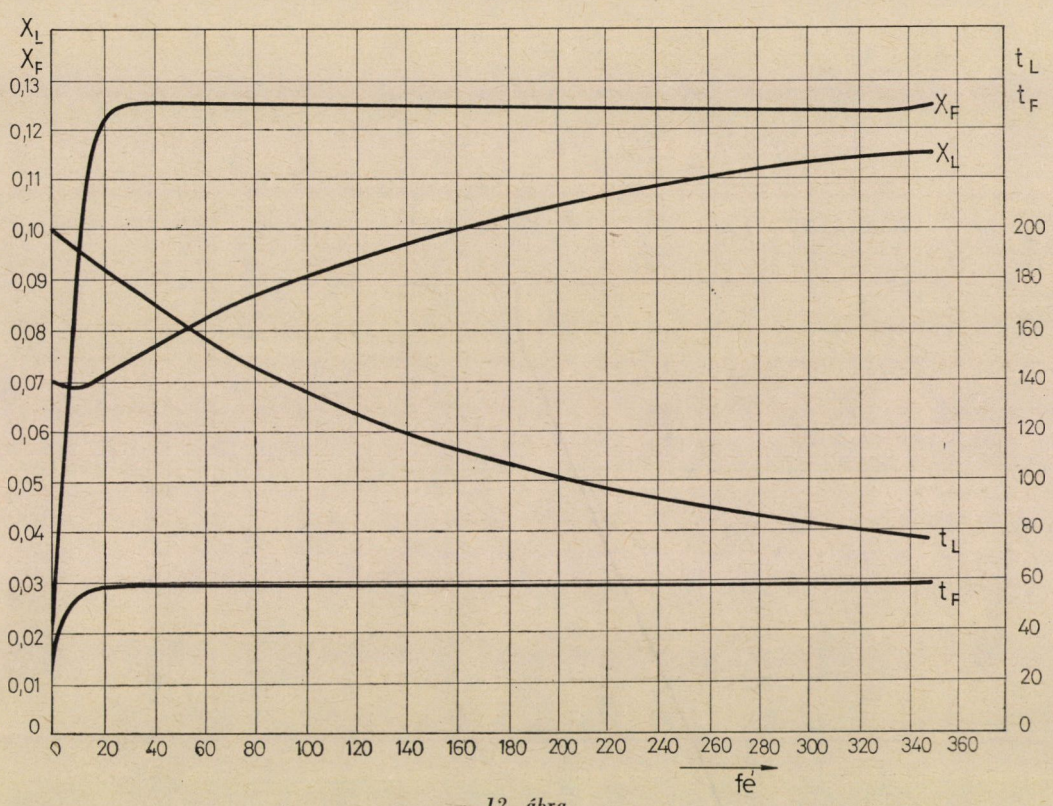
11. ábra

VII. táblázat

$f_é$	x_F	x_L	t_F	t_L
0	0,024 625 878	0,07	3,0 01	2,00 02
2,0	0,037 162 370	0,069 567 798	3,703 532 519 01	1,983 086 143 02
4,0	0,052 078 207	0,069 290 672	4,294 897 709 01	1.966 558 301 02
6,0	0,067 962 679	0,069 186 176	4,770 324 079 01	1.950 286 779 02
8,0	0,083 064 867	0,069 253 925	5,130 316 806 01	1,934 184 206 02
1,00 01	0,095 953 096	0,069 475 478	5,389 448 332 01	1.918 208 867 02
1,20 01	0,105 960 398	0,068 820 725	5,567 485 661 01	1,902 354 288 02
1,40 01	0,113 162 201	0,070 256 662	5,685 280 208 01	1.886 632 857 02
1,60 01	0,118 057 658	0,070 754 006	5,761 017 401 01	1,871 062 203 02
1,80 01	0,121 251 531	0,071 290 030	5,808 692 573 01	1,855 657 874 02
2,00 01	1,123 274 585	0,071 848 581	5,838 217 613 01	1.840 430 490 02
3,00 01	0,126 132 802	0,074 710 203	5,879 081 532 01	1,767 083 324 02
4,00 01	0,126 165 557	0,077 468 053	5,879 544 184 01	1,698 316 184 02
6,00 01	0,125 781 642	0,082 524 778	5,874 113 662 01	1.573 376 190 02
8,00 01	0,125 458 628	0,087 016 869	5,869 531 117 01	1,463 344 431 02
1,000 02	0,125 203 457	0,091 010 676	5,865 902 311 01	1.366 258 033 02
1,200 02	0,125 001 688	0,094 564 432	5,863 027 449 01	1,280 450 430 02
1,400 02	0,124 841 931	0,097 728 957	5,860 747 727 01	1.204 500 158 02
1,600 02	0,124 715 290	0,100 548 721	5,858 938 408 01	1.137 185 743 02
1,800 02	0.124 614 802	0,103 062 738	4,857 501 354 01	1,077 456 736 02
2,000 02	0.124 534 997	0,105 305 311	5,856 359 235 01	1.024 402 360 02
2,200 02	0,124 471 575	0,107 306 659	5,855 451 025 01	9,722 356 403 01
2,400 02	0,124 421 144	0,109 093 453	5,854 728 491 01	9,352 678 356 01
2,600 02	0,124 381 023	0,110 689 269	5,854 153 470 01	8,978 991 782 01
2,800 02	0,124 349 095	0,112 114 977	5,853 695 725 01	8.646 042 210 01
3,000 02	0,124 323 681	0,113 389 074	5,853 331 276 01	8.349 218 444 01
3.200 02	0.124 303 449	0.114 527 972	5,853 041 086 01	8.084 465 318 01
3,400 02	0,124 287 341	0,115 546 249	5,852 810 027 01	7,848 209 920 01
3,505 02	0,125 614 956	0,116 003 583	5,871 293 998 01	7,734 826 874 01

VIII. táblázat

$f_é$	x_F	x_L	t_F	t_L
0	0,102	0,07	5,507 3 01	8,0 01
0,50	0,103 013 328	0,070 847 065	5,517 021 089 01	7,989 311 069 01
1,00	0,103 138 044	0,071 687 349	5,519 191 772 01	7,978 715 249 01
1,50	0,103 130 337	0,072 525 476	5,519 057 716 01	7,968 179 599 01
2,00	0,103 961 059	0,073 361 138	5,516 110 556 01	7,957 694 354 01
2,50	0,102 596 603	0,074 193 956	5,509 731 027 01	7,947 247 735 01
3,00	0,101 993 432	0.075 023 472	5,499 168 619 01	7,936 825 515 01
3,50	0,101 107 884	0,075 849 141	5,483 519 709 01	7,926 410 517 01
4,00	0,099 886 473	0,076 670 310	5,461 705 319 01	7,915 982 027 01
4,50	0,098 271 944	0,077 486 218	5,432 450 443 01	7,905 515 142 01
5,00	0,096 204 419	0,078 295 991	5,394 267 895 01	7,894 980 047 01
5,50	0,093 624 937	0,079 098 642	5,345 450 705 01	7,884 341 252 01
6,00	0,090 480 628	0,079 893 092	5,284 078 111 01	7,873 568 832 01
6,50	0,086 731 501	0,080 871 196	5,208 040 701 01	7,862 577 699 01
7,00	0,082 358 431	0,081 452 800	5,115 089 872 01	7,851 347 006 01
7,05	0,081 886 896	0,081 529 640	5,104 775 490 01	7,850 020 669 01



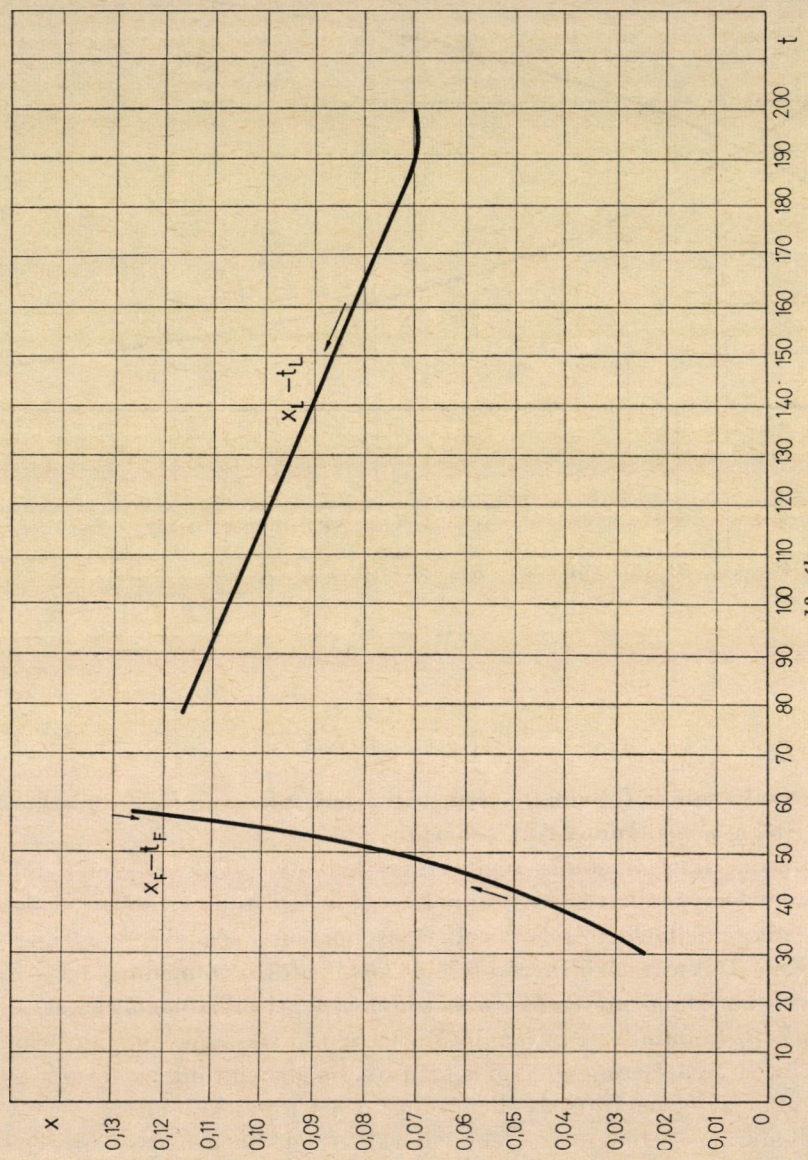
12. ábra

d) *Következtetések*

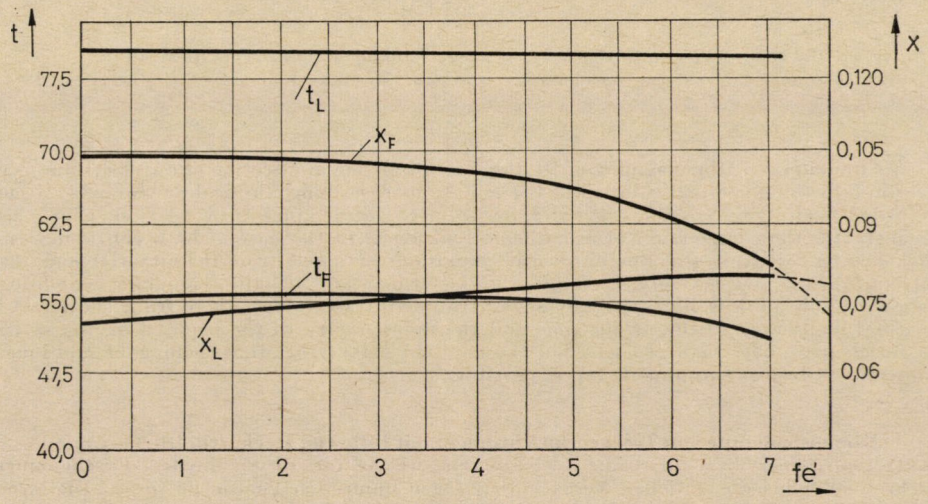
A szakaszos és folyamatos szárítási feladatok kapcsán a következő általános jellegű megállapításokat tehetjük.

A numerikus megoldás segítségével lehetővé válik az esetek többségében el nem hanyagolható tényezőknek — a levegő túlhevítéséhez, valamint a nedves anyag felmelegítéséhez szükséges hőmennyiségnek — a figyelembevétele. Ez a szükséges érintkezési felület növekedésén túlmenően azért is jelentős, mivel az eddigi méretezési módszerek a fenti elhanyagolásokat megtéve tulajdonképpen mindig egyenáramú esetre szorítkoztak, ugyanis, mint azt említettük és az összefüggésekből is kitűnik, ha eltekintünk az előző két tényezőtől, akkor az egyenáram és ellenáram között nincs különbség.

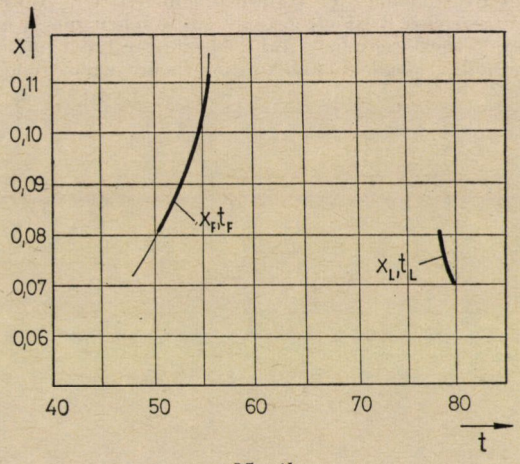
Ellenáram esetében probléma merülhet fel, ha a nedves anyag belépő hőmérséklete kisebb a kilépő szárítóközeg állapotjelzői által meghatározott felületi hőmérsékletnél. Ekkor az $x_F(f_{\dot{e}})$ és $x_L(f_{\dot{e}})$ görbék valahol metszik egymást, és a készülék további (előmelegítő) szakaszában a deszorpció (szárítás)


x
0,13
0,12
0,11
0,10
0,09
0,08
0,07
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
150
160
170
180
190
200
t
$x_F - t_F$
$x_L - t_L$

13. ábra



14. ábra



15. ábra

helyett adszorpció történik, tehát szárítás helyett növekszik a nedves anyag nedvességtartalma. A megoldás: ezt a tényt elfogadjuk, és így az előmelegítésre nem kell külön készüléket építeni vagy a felmelegítést külön hőcserélőben oldjuk meg. Megoldást jelenthet az is, ha kisebb nedvességtartalmú vagy magasabb hőmérsékletű szárítóközeget alkalmazunk. Adott feladat kvantitatív jellemzői dönthetik el, hogy a három megoldás közül melyik gazdaságosabb.

Összefoglalva, a fentiekből az következik, hogy a hagyományos méretezési módszerek a szárítási időre, illetve a folyamatos szárításnál egyenáram esetére a szükségesnél kisebb értéket adnak, ellenáram esetére pedig teljesen alkalmatlanok.

IRODALOM

1. SZENTGYÖRGYI S.: Vegyipari gépek II. I. rész. Tankönyvkiadó, Budapest 1966.
2. GINZBURG, A. Sz.: Szárítás az élelmiszeriparban. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1968.

Computerized Dimensioning of Drying Facilities. The application of an electronic computer makes the numerical solution of the equations describing physical phenomena without the usual neglections possible, in order to promote a true analytical solution. The paper demonstrates the composition of a mathematical model in the case of both continuous and batch drying, by expressing the differential equations obtained from the material and thermal equilibrium, respectively, and by the determination of the boundary conditions. Practical application is illustrated by several numerical examples where from the effect of the usual neglections of the drying time and the dimensioning of the required drying surface can be clearly understood. In addition the method makes the dimensioning of continuous counterflow drying equipment types possible.

Dimensionierung von Trockeneinrichtungen mit Hilfe von Rechnern. Die Verwendung der Elektronenrechner ermöglicht die Gleichungen, welche die physikalischen Erscheinungen beschreiben, ohne die üblichen Vernachlässigungen numerisch geneau zu lösen. Die Arbeit zeigt für absatzsweises und für kontinuierliches Trocknen die Schaffung des mathematischen Modells durch Aufschreiben der aus den Stoff- und Wärmebilanzen sich ergebenden Differentialgleichungen und durch Bestimmung der Randbedingungen. Die Anwendung der Methode wird anhand mehrerer numerischer Beispiele gezeigt, aus welchen die Auswirkung der üblichen Vernachlässigungen auf die Trockenzeit, bzw. auf die benötigte Trockenfläche abgelesen werden kann. Die vorliegende Methode ermöglicht auch kontiniurliche Gegenstromtrockeneinrichtungen zu dimensionieren.

RÚDSZERKEZETEK HÁLÓZATELMÉLETÉRŐL

SINGER DÉNES*
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

[Beérkezett 1971. augusztus 24.]

A tanulmány a rúdszerkezetek statikájának hálózatelméleti megfogalmazását ismerteti. Megmutatja, hogy az eddigi mátrixmódszerekkel szemben a hálózati szemlélet a probléma lényegesen mélyebb megfogalmazását teszi lehetővé. A munka behatóan foglalkozik a rúdszerkezetek statikájában eddig alig alkalmazott diakoptikai módszerekkel és levezetését adja a rúdhálózatok diakoptikája egyik alapösszefüggésének. Végül becslést ad az ennek alkalmazásával elérhető relatív időmegtakarításra vonatkozólag.

1. Bevezetés

A tartók statikájában a nehézkes grafoanalitikai módszereket mindinkább kiszorítják a mátrixalgebrai megfontolásokon alapuló számítógépes módszerek. A mátrixos számítási mód nagy előnye, hogy megnöveli az összefüggések áttekinthetőségét és megkönnyíti a számítógépprogramok szerkesztését. Ennek főleg bonyolult tartószerkezeteknél van jelentősége.

A mátrixos módszerek bevezetése a tartók statikájába más vonatkozásban is jelentős, ugyanis előkészíti a talajt a kérdéskomplexumot lényegesen mélyebben megalapozó szemlélet számára. Ez az új szemlélet, amely a legkülönbözőbb fizikai jelenségek értelmezését teszi lehetővé az utolsó évek irodalmában „diszkrét rendszerek elmélete", hálózatmechanika vagy „fizikai hálózatelmélet" neveken szerepel. Lényegében véve a villamoshálózatok törvényszerűségeinek és számítási módszereinek általánosításáról van szó, melyhez G. KRON alapvető munkássága nyújtott szilárd alapokat [2]. Az általa bevezetett gráfelméleti és tenzoranalitikai megfontolások megszabadították a villamoshálózatok elméletét a szűk hidraulikai elképzelésektől. Az így nyert formalizmus magától kínálkozik másfajta rendszerek, így rúdrendszerek statikai vizsgálatára is, anélkül hogy ebben az esetben bárminemű „folyó" médiumról volna szó.

A továbbiakban fizikai hálózatokról ill. speciálisan a tartók statikája vonatkozásában rúdhálózatokról fogunk beszélni. *Fizikai hálózat* alatt olyan fizikai rendszert értünk, amely ténylegesen vagy gondolatban diszkrét ele-

* Singer Dénes, Budapest II., Furulya u. 5.

mekre bontható, amelyek kapcsolatát egy irányított gráffal lehet jellemezni. A rúdhálózatok esetében az elemek erők és erőpárok által igénybevett „rudak", azaz olyan szilárd alakzatok, amelyek egyik mérete a többivel szemben kitüntetett. A rendszert jellemző gráf csupán az elemek kapcsolatának topológiáját írja le, és így a rúdhálózatnál nem tévesztendő össze ennek geometriai konfigurációjával (mely a terhelés folytán megváltozhatik).

Az adott definíció kiegészítésre, ill. szűkítésre szorul. Az elemek csupán ún. kétpólusú elemek lehetnek, azaz a hálózatnak csupán két csomópontjához kapcsolódhatnak. Az egyes elemeket leíró egyenleteknek az

$$e = \mathbf{Z}(i) \quad \text{vagy} \quad i = \mathbf{Y}(e) \tag{1}$$

alakkal kell bírniok, ahol i és e *átmenő*, ill. *átfogó* változók, ill. vektorok („through" resp. „across-variables").

Anélkül, hogy itt az átmenő és átfogó változó fogalmának pontos definícióját adnánk, e két fogalmat úgy jellemeznénk, mint az i villamos árammal, ill. e feszültséggel *analóg változókat* és ezen analógiára emlékeztetendően választottuk jelölésüket. A továbbiakban a rövidség kedvéért átmenő és átfogó változók helyett i — ill. e — változókról fogunk beszélni.

2. Néhány gráfelméleti összefüggés

Mivel a fizikai hálózat egyenleteit gráfos megfogalmazásban óhajtjuk levezetni, állítsuk össze az ehhez szükséges gráfelméleti összefüggéseket [1]. A gráf *fája* alatt az ágak olyan részhalmazát értjük, amelyek sehol sem alkotnak zárt hurkot. A *hídágak* a gráf olyan ágai, amelyek a fát zárt hurkokkal egészítik ki. A gráf struktúrája többfajta módon jellemezhető. A továbbiakban erre a célra a rövidített *ág-csomópont* mátrixot és az *ág-hurok mátrixot* használjuk, amelyeket a továbbiakban röviden **A** — ill. **C** — mátrixnak nevezünk.

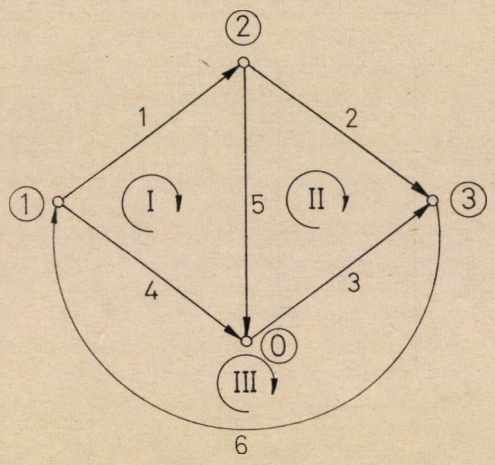
Az $\bar{\mathbf{A}}$-mátrix egy a_{ij} eleme a következőképpen definiálható (1. ábra)

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ha az ág iránya a csomóponttól elmutat} \\ -1, & \text{ha az ág iránya a csomópont felé mutat} \\ 0, & \text{ha az ág iránya a csomóponthoz nem kapcsolódik.} \end{cases}$$

Ha az $\bar{\mathbf{A}}$-mátrixból elhagyjuk azokat az oszlopokat, amelyek rögzített pontoknak felelnek meg (pl. egy tartószerkezetnél a tartók szilárd befogásának megfelelő csomópontokat), a *rövidített* ágcsomópont-mátrixot, az **A** mátrixot nyerjük.

A **C**-mátrix egy c_{ij} eleme a következőképpen definiálható

$$c_{ij} = \begin{cases} +1, & \text{ha az ágirány a hurokiránnyal megegyező} \\ -1, & \text{ha az ágirány a hurokiránnyal ellenkező} \\ 0, & \text{ha a hurok az ágat nem tartalmazza.} \end{cases}$$



A

	1	2	3
1	1	-1	
2		1	-1
3			-1
4	1		
5		1	
6	-1		1

C

	I	II	III
1	1		
2		1	
3		-1	1
4	-1		1
5	1	-1	
6			1

1. ábra

Az **A** és **C** mátrixok között a következő összefüggések állnak fenn:

$$\mathbf{A}^*\mathbf{C} = 0, \tag{2}$$

$$\mathbf{C}^*\mathbf{A} = 0. \tag{3}$$

A csillag a mátrix transzponáltját jelöli.

Az **A** és **C** mátrixokat felbonthatjuk a gráf fájának, ill. hídágainak megfelelő almátrixokra:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_T \\ \mathbf{A}_L \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_T \\ \mathbf{C}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_T \\ \mathbf{U} \end{bmatrix}. \tag{4}$$

$\mathbf{C}_L$ definíciószerűleg az **U** egységmátrixszal egyenlő. Mivel az $\mathbf{A}_T$ négyzetes és nemszinguláris mátrix, a (2) alapján a következőket írhatjuk:

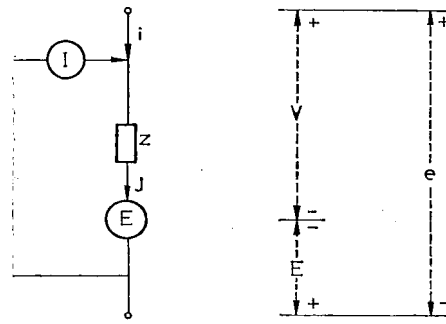
$$[\mathbf{A}_T^* \mathbf{A}_L^*] \begin{bmatrix} \mathbf{C}_T \\ \mathbf{U} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_T^* \mathbf{C}_T + \mathbf{A}_L^* = 0, \tag{4}$$

vagyis

$$\mathbf{C}_T = -[\mathbf{A}_T^*]^{-1} \mathbf{A}_L^*; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_T \\ \mathbf{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[\mathbf{A}_T^*]^{-1} \mathbf{A}_L^* \\ \mathbf{U} \end{bmatrix}. \tag{6}$$

3. A fizikai hálózatok általános egyenletei

Az általánosság kedvéért tételezzük fel, hogy a hálózat minden ága tartalmaz *e* és *i-forrásokat* (azaz bizonyos *előírt* E, ill. I értékeket) [2], [3], [4]. A hálózat egyetlen ága ebben az esetben a 2. ábrán látható sémával szemléltethető. Mint az ábrából látható az *e*, ill. *i* ág jellemzők ebben az esetben nem



2. ábra.

azonosak a kétpóluselem *átfogó*, ill. *átmenő* változóival, amelyeket most V-vel ill. J-vel jelölünk. Az ábra alapján

$$V = e+E, \quad \text{ill.} \quad J = i+I. \tag{7}$$

Lineáris rendszereknél a kétpóluselemek egyenletei

$$(e+E) = Z(i+I), \quad \text{ill.} \quad (i+I) = Y(e+E) \tag{8}$$

alakba írhatók. Z és $Y = Z^{-1}$ az elem *impedanciája*, ill. *admittanciája*. A (8) alapján a lineáris hálózat (összekapcsolatlan) ágainak összessége az

$$(e+E) = \mathbf{Z}(i+I), \tag{9a}$$

$$(i+I) = \mathbf{Y}(e+E) \tag{9b}$$

vektoregyenletekkel jellemezhető, ahol $\mathbf{Z}$ és $\mathbf{Y}$ a *hálózat* ún. primitív impedancia, ill. admittancia mátrixai.

Az *összekapcsolt* hálózatnál a (9)-en kívül még két további alapvető összefüggés lép a színre, miszerint a csomópontokban az i-változók, a hurkokban az e-változók előjeles összege nulla értékű, vagyis

$$\mathbf{A}^* i = 0, \tag{10}$$

$$\mathbf{C}^* e = 0.$$

Ezek a kifejezések a (7) alapján az

$$\mathbf{A}^*(J - I) = 0\,, \quad \text{vagyis} \quad \mathbf{A}^*J = \mathbf{A}^*\,I = I'\,, \tag{10'}$$

ill.

$$\mathbf{C}^*(V - E) = 0\,, \quad \text{vagyis} \quad \mathbf{C}^*V = \mathbf{C}^*E = E' \tag{11'}$$

alakban írhatók, ahol I' a csomóponti i-forrásváltozók, E' a hurok e-forrásváltozók vektorát jelenti. Megjegyezzük, hogy ezen két összefüggés, mely a villamoshálózatok tárgyalásánál, mint Kirchhoff-féle törvények szerepelnek, a fizikai hálózatok elmélete szemszögéből *nem törvények*, hanem az i, ill. e változók *definíciói*. A (9) (10) és (11) kifejezések — a hálózat prímer matematikai modellje — a $2 \times b$ ismeretlen változó meghatározására $2 \times b$ számú egyenletet jelentenek; b az ágak száma.

A primer matematikai modellből célszerű szekunder modelleket levezetni, amelynél $2 \times b$ számú egyenlet helyett *szimultán* csupán kisebb számú egyenletet szükséges megoldani, — míg a többi ismeretlen a változók egyszerű szubsztitúciójával nyerhető. Mátrixos megfogalmazásban ez azt jelenti, hogy a szekunder modelleknél $[2b \times 2b]$ méretű mátrix helyett csupán kisebb méretű mátrixot (ill. mátrixokat) kell invertálni, ami lényeges gépidő megtakarítást jelenthet, mivel a gépidő-igény itt hozzávetőlegesen a mátrix méretének négyzetével arányos. A szekunder modellek közül a két leglényegesebb az ún. *csomóponti*, ill. *hurok*modell.

A (9b) átrendezésével az

$$\mathbf{Y}e = i + I - \mathbf{YE} \tag{12}$$

kifejezés adódik. Mindkét oldalt A*-vel szorozva, a (10) figyelembevételével

$$\mathbf{A}^*\mathbf{Y}e = \mathbf{A}^*(I - \mathbf{YE}) \tag{13}$$

adódik. Az egyes *ágakhoz* tartozó e-változókat azaz az e-vektort kifejezhetjük a *csomópontokhoz* rendelhető e'-vektorral. Definíciószerűleg

$$e = \mathbf{A}e'\,, \tag{14}$$

A (14)-nek a (13)-ba való helyettesítésével a

$$(\mathbf{A}^t\,\mathbf{YA})e' = \mathbf{A}^t(I - \mathbf{YE})\,, \tag{15}$$

ill. az

$$e' = (\mathbf{A}^t\mathbf{YA})^{-1}\,\mathbf{A}^t(I - \mathbf{YE}) \tag{16}$$

kifejezés adódik. Ez a hálózati egyenletek *csomóponti* alakja (modellje).

A *hurokalak* hasonló módon nyerhető. A (9a) alapján

$$\mathbf{Z}i = e + (E - \mathbf{Z}I). \tag{17}$$

Mindkét oldalt $\mathbf{C}^*$-vel szorozva, a (11) figyelembevételével

$$\mathbf{C}^*\mathbf{Z}i = \mathbf{C}^*(E - \mathbf{Z}i) \tag{18}$$

adódik. Az i változókat kifejezhetjük az i' hurokváltozókkal. A $\mathbf{C}$ hurokmátrix definíciója alapján

$$i = \mathbf{C}i'. \tag{19}$$

A (19)-nek a (18)-ba való behelyettesítésével a keresett hurokalakot nyerjük:

$$i' = (\mathbf{C}^*\mathbf{Z}\mathbf{C})^{-1}\,\mathbf{C}^*(E - \mathbf{Z}I). \tag{20}$$

A csomóponti alaknál az invertálandó $\mathbf{Y}_N = \mathbf{A}^*\mathbf{Y}\mathbf{A}$ csomóponti admittanciamátrix $[n \times n]$-es méretű, ahol n a *szabad* csomópontok száma. A hurokalaknál szereplő $\mathbf{Z}_H = \mathbf{C}^*\mathbf{Z}\mathbf{C}$ hurokimpedanciamátrix $[(b - n) \times (b - n)]$ méretű. Az egyik vagy másik alak használatát, így elsősorban a hálózat struktúrája indokolja: kevéssé hurkolt (fa-szerű) hálózatoknál a hurok, erősen hurkoltaknál a csomóponti alak használata előnyösebb. Mindenesetre a csomópontok és ágak számán kívül sok esetben még más szempontok is számbajöhetnek a modell megválasztásakor.

4. Rúdhálózatok egyenletei

A (9)÷(20) egyenletek arra az esetre vonatkoztak midőn a fizikai hálózat lineáris és az ágak a (8) skaláris összefüggésekkel írhatók le. Könnyen belátható, hogy formálisan hasonló egyenletek nyerhetők arra az esetre is, ha egyetlen ág önmagában is — mint előzően az *egész* hálózat — vektoregyenlettel van leírva. Ezen (hiper) hálózatok egyenletei a (9)÷(20) egyenletektől csak abban különböznek, hogy az e, i, E, I stb. vektorok helyére itt megfelelő *hipervektorok* lépnek. Úgyszintén az $\mathbf{A}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{Z}$, $\mathbf{Y}$ mátrixok is hipermátrixok.

Ez az eset áll fenn a rúdhálózatoknál. Egyetlen rúd külső és belső erői, valamint deformációja (elmozdulása) között a következő összefüggés áll fenn ([5] 78. oldal):

$$u_k^{(\xi,\eta,\zeta)} = \mathbf{B}_{jk}\,u_j^{(\xi,\eta,\zeta)} + \mathbf{F}_{jk}\,s_{jk} + t_{jk}, \tag{21}$$

ahol u_k, ill. u_j a rúd k, ill. j végpontjának elmozdulásvektorai, s_{jk} s belső erők, t_{jk} az előírt relatív elmozdulások vektora. B_{jk} az átviteli mátrix, F_{jk} a rúd hajlékonysági mátrixa, j és k a rúd végpontjainak indexei. Az u_k, u_j, t_{jk} hatméretű vektorok komponensei a rúd saját ξ, η, ζ-koordinátáinak megfelelő elmozdulások és az ezen tengelyeknek megfelelő elfordulások. Az s_{jk} komponensei az ugyanezen irányokba ható erők ill. forgatónyomatékok. Az F_{jk} hajlékonysági mátrix a következő alakkal bír

$$F_{jk}=\begin{bmatrix} \frac{L}{EA} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L^3}{3EJ_\zeta} & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{2EJ_\zeta} \\ 0 & 0 & \frac{L^3}{3EJ_\eta} & 0 & \frac{-L^2}{2EJ_\eta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{L}{GJ_\xi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-L^2}{2EJ_\eta} & 0 & \frac{L}{EJ_\eta} & 0 \\ 0 & \frac{L^2}{2EJ_\zeta} & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{EJ_\zeta} \end{bmatrix} \tag{21'}$$

ahol L a rúd hossza, A a rúd keresztmetszeti területe, E és G a rugalmassági, ill. nyírási modulusok, GJ_ξ az egységnyi hosszra eső csavaró merevség, EJ_η és EJ_ξ a rúd η, ill. ζ-tengelyeire vonatkozó fajlagos merevségek.

$$B_{jk}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & L \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{22}$$

Ha a

$$\mathbf{B}_{jk}^{(\xi,\eta,\zeta)}u_j^{(\xi,\eta,\zeta)}-u_k^{(\xi,\eta,\zeta)}=u_{jk}. \tag{23}$$

jelölést vezetjük be, az (21) a következő alakba írható:

$$(u_{jk}+t_{jk})=-\mathbf{F}_{jk}s \tag{24}$$

Ha a (24)-et a (8)-cal, ill. (7)-tel összevetjük, láthatjuk, hogy formálisan azonos összefüggésekről van szó. Esetünkben az *e*-ágjellemzőnek az u_{jk} deformáció, az *E*-forrásjellemzőnek a t_{jk} *előírt relatív elmozdulásvektor* felel meg. Az s_{jk}-nak, a *belső erők vektorának* megfelelője a J.

Az [5]-ben használatos szimbolikához nagymértékben alkalmazkodva az I. táblázatban összeállítottuk a fizikai hálózatok elméletében szerepet játszó

I. táblázat

Általános jellemző	Rúdrendszer jellemző	Elnevezés	Koord. rendszer
e	u	rúdvég elmozdulás	l
e′	u′	csomóponti elmozdulás	g
E	t	előírt relatív elmozdulás	l
V	V	indukált elmozdulás	l
i	q	ágerő	l
i′	q′	hurokerő	g
I	Q	előírt ágerő	l
J	s	belső erő, igénybevétel	l
I′	Q′	előírt csomóponti erő	g
Z	F	hajlékonysági mátrix	g
Y	K	merevségi mátrix	g

változóknak a rúdrendszerek statikájában érvényes megfelelőit. (Mindenesetre az [5] szimbolikájától eltérően a csomóponti változókat egyszerűen a megfelelő ágváltozó jeléhez alkalmazott vesszővel jelöltük).

Mielőtt a (16) és (20) alapján az összekapcsolt rúdhálózat csomóponti és hurokegyenleteit felírnánk szükséges két körülményt figyelembe venni, melyek a skaláris elemekből álló hálózatnál nem jelentkeznek. Mégpedig, hogy

a) (24) ágegyenletekben szereplő változók *lokális*, azaz minden ágra más és más koordináta-rendszerben vannak deklarálva, viszont a (16) ill. (20) egyenletek (ill. ezek hipervektoros) alakja csupán globális, azaz az egész hálózatra vonatkozó koordináta-rendszerben érvényesek.

b) a csomópontok nem feltétlenül viszik át az erő, ill. elmozdulásvektorok minden egyes komponensét. Pl. egy gömbcsuklóval kapcsolt rúdnál csupán a tengelymenti (az ξ-lokális koordináta) irányában ható komponens vivődik át.

Mindenekelőtt tehát meg kell nézni, hogy az I. táblázatból a (16) ill. (20) egyenletekbe behelyettesítendő változók globális (azaz az egész hálózatra vonatkozó), avagy lokális koordináta-rendszerben vannak-e adva (lásd az I. táblázat 4. oszlopát). Az utóbbi esetben megfelelő transzformációkat kell végrehajtani.

A j, k-ág u_j, ill. u_k végponti elmozdulásvektorai az ξ, η, ζ lokális koordináta-rendszerből az x, y, z globális koordináta-rendszerbe a következőképpen transzformálódnak [5]:

$$u_j^{(\xi,\eta,\zeta)} = \mathbf{T}_{jk}\, u_j^{(x,y,z)}, \tag{26}$$

ahol a T_{jk} transzformációs mátrix a következő alakkal bír:

$$\mathbf{T}_{jk} = \begin{bmatrix} \cos(\xi_{jk}, x) \cos(\xi_{jk}, y) \cos(\xi_{jk}, z) & & \\ \cos(\eta_{jk}, x) \cos(\eta_{jk}, y) \cos(\eta_{jk}, z) & \mathbf{0} & \\ \cos(\zeta_{jk}, x) \cos(\zeta_{jk}, y) \cos(\zeta_{jk}, z) & & \\ & \cos(\xi_{jk}, x) \cos(\xi_{jk}, y) \cos(\xi_{jk}, z) & \\ \mathbf{0} & \cos(\eta_{jk}, x) \cos(\eta_{jk}, y) \cos(\eta_{jk}, z) & \\ & \cos(\zeta_{jk}, x) \cos(\zeta_{jk}, y) \cos(\zeta_{jk}, z) & \end{bmatrix} \tag{28}$$

A (23) kifejezés a következőképpen transzformálódik:

$$u_{jk}^{(x,y,z)} = \mathbf{B}_{jk}\, \mathbf{T}_{jk}\, u_j^{(x,y,z)} - \mathbf{T}_{jk}\, u_k^{(x,y,z)}. \tag{27}$$

Ez a következőképpen is írható:

$$u_{j,k} = [B_{jk}\, T_{jk} - T_{jk}] \begin{bmatrix} u_j \\ u_k \end{bmatrix} = \mathbf{G}_{jk}\, u_{jk}, \tag{27}$$

ahol

$$[\mathbf{B}_{jk}\, \mathbf{T}_{jk} \; -\mathbf{T}_{jk}] = \mathbf{G}_{jk}, \tag{27'}$$

$$\begin{bmatrix} u_j \\ u_k \end{bmatrix} = u_{jk}.$$

Az egyes ágak deformációjának az x, y, z globális koordináta-rendszerbe való transzformálására vonatkozó (27) kifejezés, valamint a (14) alapján az *egész* hálózat u_r ág, és u' csomóponti elmozdulásai között az

$$u_r = \mathbf{G}_r\, \mathbf{P} u' = \mathbf{G}_c\, u' \tag{29}$$

összefüggés írható fel, ahol $\mathbf{G}_r$ az egyes ágakhoz tartozó $\mathbf{G}_{jk}$ mátrixokból képezett hipermátrix, $\mathbf{G}_c = \mathbf{G}_r\, \mathbf{P}$, ahol $\mathbf{P}$ az ágak és csomópontok, ill. ezek vektorkomponenseinek kapcsolatát kifejező topológiai mátrix, u_r, ill. u' az ág, ill. csomóponti elmozdulások hipervektorai.

Hasonlóképpen látható be, hogyan transzformálódik a j, k-ág lokális koordinátákban megadott s_{jk} igénybevétele. A k-pontban támadó Q_k erő az ágban az akció-reakció elvnél fogva egy s_{jk} ágerőt ébreszt. Az ág j-pontjában

működő Q_j erő által ébresztett erő $\mathbf{B}^*_{jk}\, s_{jk}$, ahol $\mathbf{B}^*_{jk}$ a (22)-átviteli mátrix transzponáltja. Így a rúd erőegyensúlyát a

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}^*_{jk} \\ \mathbf{U} \end{bmatrix} s_{jk} = \begin{bmatrix} Q_j \\ Q_k \end{bmatrix} \tag{30}$$

összefüggés fejezi ki.

Mivel a külső erők általában globális koordináta-rendszerben vannak adva, a belsők pedig lokálisban, a (30) a $\mathbf{T}^*_{jk}$ transzformációs mátrixszal szorzandó:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T}^*_{jk} & \mathbf{B}^*_{jk} \\ & -\mathbf{T}_{jk} \end{bmatrix} s_{jk} = \begin{bmatrix} Q_j \\ Q_k \end{bmatrix}. \tag{31}$$

Mivel a (10), ill. (10′) alapösszefüggések a globális koordináta-rendszerre vonatkoznak, az összekapcsolt hálózatnál a következő összefüggések állanak fenn:

$$\mathbf{P}^*\, \mathbf{G}^*_r\, q = \mathbf{G}^*_c\, q = 0\,; \tag{32}$$

$$\mathbf{P}^*\, \mathbf{G}^*_r\, s = \mathbf{P}^*\, \mathbf{G}^*_r\, Q\,; \quad \mathbf{G}_c\, s = \mathbf{G}_c\, Q = Q' \tag{33}$$

A q, s, Q', a q_{jk}, s_{jk}, Q_j, ill. Q_k vektorokból összeállított hipervektorok, Q a *csomóponti* terhelések (forrásnyomások) hipervektora. $\mathbf{G}^*_r$, $\mathbf{G}^*_c$ az *egész hálózatra vonatkozó* előbbi $\mathbf{G}_r$ ill. $\mathbf{G}_c$ hipermátrixok transzponáltjai.

A (10) és (14) egyenletek helyett a (32), ill. (29) egyenleteket alkalmazva, a (12) alapján a rúdhálózat számára a következő csomóponti egyenletet nyerjük (lásd az I. táblázatot):

$$u' = (\mathbf{G}^*_c \mathbf{K}\, \mathbf{G}_c)^{-1}\, \mathbf{G}^*_c (Q - \mathbf{K}t) \tag{34}$$

A rúdhálózat bizonyos számú csomópontja rögzített (szilárdan befogott). Értelemszerűen a $\mathbf{G}_c$ nem tartalmazhatja a *rögzített* csomópontoknak megfelelő oszlopokat, egyébként a (34) egyenlet túlhatározott volna. A (34)-be ezért a $\mathbf{G}_c$ helyébe ennek $[b \times n]$ dimenziójú $\mathbf{G}$ rész (hiper) mátrixát írjuk:

$$u' = (\mathbf{G}^*\, \mathbf{K}\, \mathbf{G})^{-1}\, \mathbf{G}^* (Q - \mathbf{K}t) \tag{35}$$

ahol $\mathbf{G}$ a $\mathbf{G}_c$ *szabad csomópontjainak* megfelelő részmátrix; $\mathbf{G}_c = [\mathbf{G}_p\, \mathbf{G}]$; $\mathbf{G}_p$ a $\mathbf{G}_c$ rögzített csomópontjainak megfelelő részmátrix. Ha (33) alapján a Q ágterhelés vektor helyett a Q' *csomóponti* terhelésvektort vezetjük be, a (34) helyett a

$$u' = (\mathbf{G}^*\, \mathbf{K}\, \mathbf{G})^{-1}\, Q' - (\mathbf{G}^*\, \mathbf{K}\, \mathbf{G})^{-1}\, \mathbf{G}^* \mathbf{K} t \tag{36}$$

összefüggést írhatjuk. Ez a kifejezés megegyezik a rúdrendszerek statikájának ún. elmozdulásegyenletével, amennyiben ez mátrixos alakban kerül felírásra.

Mint látható, a (34) formálisan analóg a fizikai hálózatok (16) általános csomóponti egyenletével. A különbség csupán az, hogy az egyesekből és nullákból álló **A** topológiai mátrix helyébe a **G** hipermátrix kerül, melynek elemei a rudak iránykoszinuszait és hosszúságát tartalmazó *adott* kifejezések, ill. nullák.

Általában az általános fizikai hálózatra vonatkozó (12)÷(16) kifejezések, ill. az ezekből levezethető egyéb összefüggések a rúdhálózatoknál úgy módosulnak, *hogy az* **A** *helyébe a* **G**-*t helyezzük*. Pl. a statikai számításoknál lényeges $s = (q + Q)$ igénybevétel a (12) és (14) alapján számítható:

$$J = i + I = \mathbf{Y}(\mathbf{A}e' + E). \tag{37}$$

Helyettesítve e' kifejezését, a (16)-ból a

$$J = \mathbf{Y}\,\mathbf{A}(\mathbf{A}^*\,\mathbf{Y}\mathbf{A})^{-1}(\mathbf{I}' - \mathbf{A}^*\mathbf{Y}\mathbf{E}) + \mathbf{Y}E \tag{38}$$

kifejezést nyerjük, ahol a (10′) alapján $\mathbf{A}^*I$ helyébe I'-t írtunk. Az I. táblázat alapján a (38)-ba a megfelelő rúdhálózati jellemzőket helyettesítve, és az **A**-mátrixot **G**-re kicserélve, a teljes rúderők számára a következő kifejezést nyerjük:

$$s = \mathbf{K}\mathbf{G}(\mathbf{G}^*\,\mathbf{K}\mathbf{G})^{-1}[\mathbf{Q}' - \mathbf{G}^*\mathbf{K}t] - \mathbf{K}t \tag{39}$$

Ez az összefüggés lehetőséget nyújt a rögzített csomópontoknak megfelelő reakcióerők meghatározására is. A (10′) alapján fizikai hálózat csomóponti i-forrásváltozói (és ide tartoznak a reakcióerők is), valamint az ágak i-változói között az

$$\mathbf{A}^*J = I' \tag{40}$$

összefüggés áll fenn. A rúdhálózatnál ez, amennyiben a rögzített csomópontokat külön vesszük számba,

$$\mathbf{G}_c^* s = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_p^* \\ \mathbf{G}^* \end{bmatrix} s = \begin{bmatrix} Q_p \\ Q' \end{bmatrix} \tag{41}$$

alakba írható ahol a p-indexszel ellátott vektorok a rögzített, az index nélküliek a szabad csomópontokra vonatkoznak. A rögzített csomópontok reakcióerejének Q_p-nek a meghatározására így a

$$\mathbf{Q}_p = \mathbf{G}_p^* s \tag{42}$$

kifejezés áll rendelkezésre. A (39)-ből az s kifejezését behelyettesítve, Q_p számára a

$$Q_p = \mathbf{G}_p^*\mathbf{K}\,\mathbf{G}(\mathbf{G}^*\mathbf{K}\,\mathbf{G})^{-1}[Q' - \mathbf{G}^*\mathbf{K}\,t] - \mathbf{G}_p\,\mathbf{K}t \tag{43}$$

kifejezést nyerjük.

Mindeddig feltételeztük, hogy a rögzített csomóponti elmozdulásvektorok *minden* komponense rögzített. Amennyiben a rögzítettség csak *egyes u*-komponensekre vonatkozik, az előbbi összefüggések lényegében érvényben maradnak, de a $\mathbf{G}_c$ particionalisát nem hipermátrix, hanem mátrix szinten kell végrehajtani.

Az általános fizikai hálózat (20) *hurokegyenletének* a rúdhálózatok számítására alkalmas megfelelője szintén felírható. Mindenesetre itt is, mint a csomóponti egyenlet levezetésénél, a topológiai mátrix helyébe egy másik mátrix lép, mely számot vet nemcsak a hálózat topológiai viszonyaival, hanem ennek metrikájával is.

A legegyszerűbben úgy jutunk célhoz, hogy a **C** hurokmátrixot a (6) alapján az **A** mátrixszal, ill. ennek $\mathbf{A}_T$ fa, ill. $\mathbf{A}_L$ hídágkomponenseivel kifejezzük. Ha ezután, ugyanúgy mint az előbbiekben, az **A**, $\mathbf{A}_T$ és $\mathbf{A}_L$ helyett **G**, $\mathbf{G}_T$ ill. $\mathbf{G}_L$-et írunk, a

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -(\mathbf{G}_T^*)^{-1}\,\mathbf{G}_L^* \\ \mathbf{U} \end{bmatrix} \tag{44}$$

mátrixot nyerjük, amely a rúdhálózatnál ugyanazt a szerepet tölti be, mint a **C** mátrix a (20) általános egyenletnél. A rúdhálózat hurokegyenlete tehát az I. táblázat felhasználásával a (20)-ból közvetlenül nyerhető:

$$q' = (\mathbf{D}^*\mathbf{F}\,\mathbf{D})^{-1}\,\mathbf{D}^*(t - \mathbf{F}\,Q) \tag{45}$$

A (45) a statikában erőmódszernek nevezett eljárás alapegyenletének felel meg; (lásd a [4] 131. oldalát).

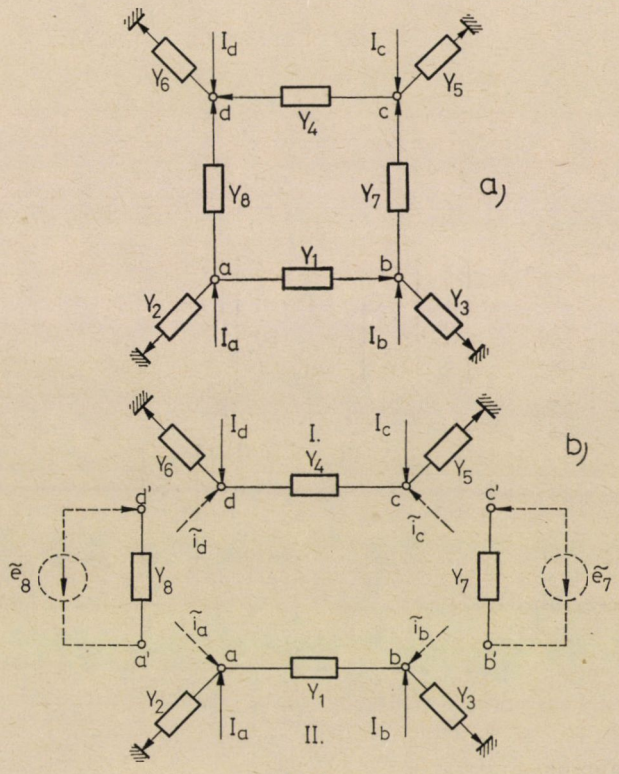
5. Rúdhálózatok diakoptikája

Az előbbiekben megmutattuk, hogy a fizikai hálózatok elméletének alkalmazásával ugyanazok az összefüggések nyerhetők, amelyek a tartók statikájában az ismert elmozdulás, ill. erőmódszer alkalmazásával klasszikus mechanikai megfontolások alapján adódnak. Szeretnénk most megmutatni, hogy ezen túlmenően az új szemlélet lényeges gyakorlati előnyöket nyújthat. Itt elsősorban a G. KRON által diakoptikai módszereknek nevezett eljárások alkalmazására gondolunk, amelyek lehetővé teszik a hálózati egyenletek numerikus megoldásának részmegoldásokból való felépítését [6]. Az így elért időmegtakarítás különösen bonyolult szerkezetek számításakor számottevő.

A tartók statikájában egyébként eddig sem volt ismeretlen a részekre való bontás technikája. Ilyen módszer például a statikailag határozatlan törzstartó módszere. Úgy véljük azonban, hogy a hálózatelméleti szemlélet lényegesen hozzájárulhat ezen eljárások továbbfejlesztéséhez. A diakoptika által

kínált több módszer közül itt csak eggyel kívánunk foglalkozni, azzal, amely a rúdrendszerek statikájára viszonylag egyszerűen látszik alkalmazhatónak.

Tekintve, hogy a rúdhálózat viszonyait bizonyos mértékben bonyolítja az a körülmény, hogy az egyes elemekre vonatkozó lokális koordináta-rendszerekben kifejezett összefüggéseket egy globális koordináta-rendszerbe kell transzformálni, először vezessük le összefüggéseinket egy a rúdrendszerrel



3. ábra

strukturálisan azonos fizikai hálózatra. A 3a. ábrán látható hálózat a 7 és 8 ágak kiiktatásával a I és II részhálózatokra bontható. Feladatunk, hogy a két rész egyenleteinek megoldásával meghatározzuk az eredeti hálózatban az I_a, I_b, I_c, I_d csomóponti i-források hatására létrejövő e'_a, e'_b, e'_c, e'_d csomóponti változókat.

A 7 és 8 ágak kiiktatásának ellensúlyozására az a, b, c, d csomópontokban $\tilde{i}_a$, $\tilde{i}_b$, $\tilde{i}_c$, $\tilde{i}_d$ hipotetikus áramokat tételezhetünk fel, melyek nagyságát és irányát úgy vesszük fel, hogy a csomóponti e-változók a szétbontás ellenére ne szenvedjenek változást. A 7 és 8 ágak szempontjából az I és II részhálózatok

mint e-források foghatók fel, melyek a kiiktatott ágakban ugyanazon i-értékeket szolgáltatják, mint melyek az eredeti hálózatnál is fennálltak. Ezen e_7, e_8 értékeket úgy foghatjuk fel, mint a 7, ill. 8 elemekkel sorba kapcsolt e-források jellemzőit (lásd a 2b. ábrát).

Mint az ábra alapján látható, a következő egyenlőségek állanak fenn:

$$\begin{aligned} \tilde{i}_a &= -i_8 \\ \tilde{i}_b &= -i_7 \\ \tilde{i}_c &= i_7 \\ \tilde{i}_d &= i_8, \end{aligned} \tag{46}$$

illetve

$$\begin{aligned} \tilde{e}_7 &= e'_b - e'_c \\ \tilde{e}_8 &= e'_a - e'_d \end{aligned} \tag{47}$$

Vektoralakban írva,

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_a \\ \tilde{i}_b \\ \tilde{i}_c \\ \tilde{i}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_7 \\ i_8 \end{bmatrix} \tag{46'}$$

illetve

$$\begin{bmatrix} \tilde{e}_7 \\ \tilde{e}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e'_a \\ e'_b \\ e'_c \\ e'_d \end{bmatrix} \tag{47'}$$

Vagy még egyszerűbben

$$\tilde{i}' = \mathbf{C}_1 i_k, \tag{46''}$$

illetve

$$\tilde{e}_k = -\mathbf{C}_1^* e' \tag{47''}$$

ahol $\mathbf{C}_1$ egy kapcsoló mátrix.

Az I és II részhálózatokra külön-külön felírhatjuk a (16) csomóponti egyenleteket. Mint könnyen ellenőrizhető, a két egyenlet

$$\begin{bmatrix} (Y_1+Y_6) & -Y_1 \\ -Y_1 & (Y_1+Y_5) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e'_a \\ e'_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I'_a+\tilde{i}_a \\ I'_b+\tilde{i}_b \end{bmatrix} \tag{48}$$

$$\begin{bmatrix} Y_4+Y_5 & -Y_4 \\ -Y_4 & Y_4+Y_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_c \\ e_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I'_c+\tilde{i}_c \\ I'_d+\tilde{i}_d \end{bmatrix} \tag{49}$$

A baloldali mátrixokat $\mathbf{Y}_{N1}$ ill. $\mathbf{Y}_{N2}$-vel jelölve

$$\mathbf{Y}_{N1} e'_1 = I'_1+\tilde{i}_1 \tag{48'}$$

$$\mathbf{Y}_{N2} e'_2 = I'_2+\tilde{i}_2 \tag{49'}$$

Az 1 és 2 index az I, ill. II részhálózatokra utal. A (48′) és (49′) felírható egyetlen hipermátrix egyenlet alakjában

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{N1} & 0 \\ 0 & \mathbf{Y}_{N2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1' \\ e_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I_1'+\tilde{i}_1) \\ (I_2'+\tilde{i}_2) \end{bmatrix}$$

A diagonális hipermátrixot $\mathbf{Y}_{Nd}$-vel jelölve, az (50) a

$$\mathbf{Y}_{Nd}\, e' = I'+\tilde{i} \tag{50′}$$

alakba írható.

A (7) és (8) kapcsolóágakra vonatkozólag a 2b. ábra alapján felírhatjuk a következő egyenletet:

$$\begin{bmatrix} Y_7^{-1} & 0 \\ 0 & Y_8^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_7 \\ i_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{e}_7 \\ \tilde{e}_8 \end{bmatrix} \tag{51}$$

Ha a 7 és 8 kapcsolóág primitív admittancia, ill. impedancia, mátrixát $\mathbf{Y}_K$-val ill. $\mathbf{Z}_K$-val jelöljük, ez az

$$\mathbf{Y}_K^{-1} i_K = \mathbf{Z}_K i_K = \tilde{e}_K \tag{51′}$$

alakba írható.

A (46″) és (47″) alapján az (50) és (51′) egyenletekből kiküszöbölhetők az $\tilde{e}$ és $\tilde{i}$ hipotetikus vektorok

$$\mathbf{Y}_{Nd}\, e' = I'+\mathbf{C}_1\, i_K \tag{52}$$

$$\mathbf{Z}_K\, i_K = -\mathbf{C}_1^*\, e'$$

Az (52) első egyenletből az e'-t kifejezve, az

$$e' = \mathbf{Y}_{Nd}^{-1}(I'+\mathbf{C}_1 i_K) \tag{53}$$

egyenletet nyerjük. Ebből az (52) második egyenletébe való helyettesítéssel a

$$i_K = -\mathbf{M}^{-1}\, \mathbf{C}_1\, \mathbf{Y}_{Nd}^{-1}\, I' \tag{54}$$

kifejezés adódik, ahol

$$\mathbf{M} = \mathbf{Z}_K+\mathbf{C}_1^*\, \mathbf{Y}_{Nd}^{-1}\, C_1 \tag{54′}$$

Az (54)-nek az (53)-ba való helyettesítésével a csomóponti e-változók meghatározására végül a következő kifejezés adódik

$$e' = \mathbf{Y}_{Nd}^{-1}[I' - \mathbf{C}_1\, \mathbf{M}^{-1}\, \mathbf{C}_1^*\, \mathbf{Y}_{Nd}^{-1}\, I'] \tag{55}$$

Könnyen belátható, hogy az (55) egyenlet független attól, hogy a hálózatot hány részhálózatra bontjuk. Általános esetben az $\mathbf{Y}_{Nd}$ $[m \times m]$ dimenziójú diagonális hipermátrix

$$\mathbf{Y}_{Nd} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{N1} & & \mathbf{0} \\ & \mathbf{Y}_{Ni} & \\ \mathbf{0} & & \mathbf{Y}_{Nm} \end{bmatrix}, \tag{56}$$

alakú, ahol $\mathbf{Y}_{Ni}$ az i-edik részhálózat nodális admittanciamátrixa, m a részhálózatok száma. A $\mathbf{Z}_K$ a *kapcsolóágak* primitív impedanciamátrixa.

$$\mathbf{Z}_K = \begin{bmatrix} Z_i & & 0 \\ & Z_j & \\ \mathbf{0} & & Z_k \end{bmatrix}, \tag{57}$$

ami egy $[b_k \times b_k]$ dimenziójú diagonális mátrix; b_k a kapcsolóágak száma. A $\mathbf{C}_1$ kapcsolómátrix egy 1, —1, 0 elemekből álló $[n \times b_k]$ dimenziójú mátrix; n a teljes hálózat csomópontjainak száma (a rögzített pontok kivételével). A $\mathbf{C}_1$ elemei a következőképpen vannak definiálva:

$$\mathbf{C}_{aj} = \begin{cases} 1, \text{ ha a } j\text{-edik kapcsolóág iránya az } a \text{ csomópont felé mutat} \\ -1, \text{ ha a } j\text{-edik kapcsolóág iránya az } a \text{ csomóponttól elmutat} \\ 0, \text{ ha a } j\text{-edik kapcsolóág nem tartalmazza az } a \text{ csomópontot.} \end{cases}$$

Alkalmazzuk mostan az általános fizikai hálózatokra bevezetett (56) kifejezést, ill. az ehhez vezető diakoptikai megfontolásokat rúdhálózatokra. Azon körülmény, hogy a hálózat ág és csomóponti e, ill. i-jellemzői itt nem skalárok, hanem vektorok, formálisan csak keveset változtat az eredményen, legfeljebb annyit, hogy ott ahol az előzőekben vektorok és mátrixok álltak, most hipervektorok, ill. hipermátrixok kerülnek, (a hipervektorok és hipermátrixok helyére a megfelelő magasabbrendű alakzatok kerülnek).

Az (50′) helyett itt a

$$\mathbf{K}_{Nd}\, u^{(x,y,z)'} = Q^{(x,y,z)'} + \tilde{q}^{(x,y,z)'} \tag{58}$$

kifejezést írhatjuk fel, ahol

$$\mathbf{K}_{Nd} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1^* \mathbf{K}_1 \mathbf{G}_1 & & & \mathbf{0} \\ & \mathbf{G}_i^* \mathbf{K}_i \mathbf{G}_i & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & \mathbf{G}_m^* \mathbf{K}_m \mathbf{G}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{N1} & & & \mathbf{0} \\ & \mathbf{K}_{Ni} & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & \mathbf{K}_{Nm} \end{bmatrix}. \tag{59}$$

u', Q' a részhálózatok csomóponti elmozdulásaiból és csomóponti terheléseiből képzett hipervektorok, q' a virtuális csomóponti terhek hipervektora.

Az (51)'-nek megfelelő, a rúdhálózat esetére érvényes egyenlet a következő:

$$\mathbf{F}_k s_k^{(\xi,\eta,\zeta)} = \mathbf{G}_k \tilde{u}_k^{(x,y,z)}, \tag{60}$$

ahol u_k a hipotetikus forráselmozdulások, s_k a kapcsolórudak belső erőinek hipervektorai, $\mathbf{G}_k$ a kapcsolórudak transzformációs mátrixa.

A (46')-nak megfelelő egyenletet a kapcsolórudak s belső és q végponti erői között fennálló összefüggések alapján írhatjuk fel

$$\tilde{q}'^{(x,y,z)} = \mathbf{C}_2 \mathbf{G}_k^* s_k^{(\xi,\eta,\zeta)}, \tag{61}$$

ahol a $\mathbf{C}_2$ hipermátrix a *kapcsolórudak végpontjai* és a teljes *hálózat csomópontjai* között létesítenek kapcsolatot; a $\mathbf{C}_2$ elemei $\mathbf{U}[6\times 6]$ egységmátrixok, ill. $\mathbf{0}[6\times 6]$ nullmátrixok aszerint, hogy a kapcsolórudak végpontjai a kérdéses csomóponthoz kapcsolódnak-e vagy sem.

A (47'') kifejezésnek a rúdhálózatnak megfelelő alakja:

$$\tilde{u}_k'^{(x,y,z)} = -\mathbf{C}_2^* u'^{(x,y,z)}. \tag{62}$$

A jobb áttekinthetőség kedvéért a (60), (61) és (62) kifejezésekben megjelöltük, hogy a változók lokális, ill. globális koordináta-rendszerben értendők-e.

Az (58) és (60)-ból a (61) és (62) segítségével eltávolíthatjuk a $\tilde{q}'$ és $\tilde{u}_k$ hipotetikus vektorokat

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{Nd} u' &= Q' + \mathbf{C}_2 G_k^* s_k, \\ \mathbf{F}_k s_k &= \mathbf{G}_k C_2^* u'. \end{aligned} \tag{63}$$

A (63) első egyenletéből kifejezve az u'-t és a másodikba helyettesítve, a következő összefüggéseket nyerjük:

$$u' = \mathbf{K}_{Nd}^{-1}[Q' + \mathbf{C}_2 \mathbf{G}_k^* s_k], \tag{64}$$

$$s_k = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{G}_k \mathbf{C}_2^* \mathbf{K}_{Nd}^{-1} Q', \tag{65}$$

ahol

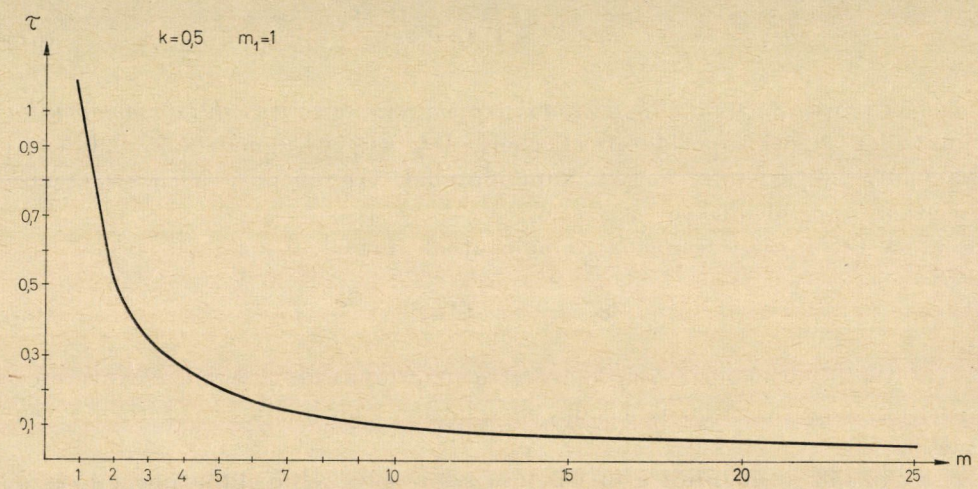
$$\mathbf{W} = \mathbf{F}_k - \mathbf{G}_k \mathbf{C}_2^* \mathbf{K}_{Nd}^{-1} \mathbf{C}_2 \mathbf{G}_k^*.$$

Az s_k-t a (65)-ből a (64)-be helyettesítve, a csomóponti elmozdulásokra a következő kifejezés adódik:

$$u' = \mathbf{K}_{Nd}^{-1}[Q' - \mathbf{C}_2 \mathbf{G}_k^* \mathbf{W}^{-1} \mathbf{G}_k \mathbf{C}_2^* \mathbf{K}_{Nd}^{-1} Q']. \tag{66}$$

A (66) egyenlet a rúdhálózat csomóponti elmozdulását a hálózat tetszőleges felosztása esetére szolgáltatja. Nyilvánvaló, hogy előnyös a rendszert olyan részhálózatokra felbontani, amelyek egymás közt csupán kisszámú rúddal vannak kapcsolva. Ez biztosítja, hogy a **W**-mátrix kicsinyméretű legyen és így az invertáláshoz szükséges idő is kicsinynek adódjék.

A $\mathbf{K}_{Nd}$-mátrix invertálása, minthogy diagonális hipermátrixról van szó, a részmátrixok invertálásával történik. A gépidőigény itt annál kisebb, minél



4. ábra

kisebb méretűek a részmátrixok, tehát minél nagyobb számú részre osztottuk a rendszert. Különösen nagy megtakarítás érhető el, ha a rendszer azonos modulokból van fölépítve, úgyhogy az ezeknek megfelelő részhálózatok mátrixait csak egyszer kell invertálni.

Adjunk durva becslést arra vonatkozólag, hogy milyen nagy a (66) alkalmazásából adódó időmegtakarítás az egyszerű csomóponti módszer használatával szemben. Tételezzük fel, hogy a rendszert $m = (m_1 + m_2)$ egyenlő nagyságú részre bontottuk ahol m_1 az azonos szerkezetű részek száma. Tételezzük fel továbbá, hogy a részhálózatokat páronként *átlagban* k számú rúd köti össze. A mátrixinverzióhoz szükséges gépidőt a csomópontok számával négyzetesen arányosnak vesszük fel, és a (66)-ban szereplő egyes műveletek gépidejét a mátrixinverzió mellett elhanyagoljuk. A **W** ill. $\mathbf{K}_{Nd}$ mátrixok invertálásához szükséges idők a

$$\left(\frac{k}{2}\right)^2 \left(\frac{n}{m}\right)^2, \quad \text{ill.} \quad (m-m_1+1)\left(\frac{n}{m}\right)^2$$

kifejezéssel arányosak. Minthogy az elmozdulás módszernél szükséges $\mathbf{K}_N$ (nemdiagonális) mátrix inverziója n^2-nel arányos, a τ viszonylagos időmegtakarítás

$$\tau = \frac{m \quad m_1 + (k^2/4) + 1}{m^2}. \tag{67}$$

A (67) alapján szerkesztett 4. ábra érzékelteti, hogy a vázolt diakoptikai módszer alkalmazásával milyen tetemes időmegtakarítás érhető el $m_1 = 1$, $k = 0{,}5$ értékeknél a hálózatnak 5 részre való bontása esetén a gépidőszükséglet éppen ötödrészre csökken. Mindenesetre mint az ábra mutatja az aláosztás bizonyos határon túl nem hoz gépidőcsökkenést. A (67) alapján könnyen ellenőrizhető, hogy a τ értéke a k-tól, vagyis a kapcsoló rudak számától alig függ.

IRODALOM

1. Seshu S.—Reed M. B.: Linear Graphs and Electrical Networks Addison—Wesley, Mass 1961.
2. Kron, G.: Tensor Analysis of Networks J. Wiley N. Y., 1939.
3. Branin, F. H.: Computer Methods of Network Analysis IEEE Int. Conv. Rec. CT5 1967, pp. 45—63.
4. Fenves, S. J.—Branin, F. H.: Network-topological Formulation of Structural Analysis *Proc. ASCE* ST4 August 1963, pp. 483—513.
5. Szabó I.—Roller B.: Rúdszerkezetek elmélete és számítása. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1971.
6. Kron, G.: Diakoptics Macdonald, London 1961.

Network Theory of Bar Structures. The network theory definition of bar structure static was explained. It was demonstrated that, as compared to hitherto matrix techniques, the network concept would permit a much deeper definition of the problems encountered. Diacoptic methods so far hardly employed in bar structure statics was thoroughly dealt with, and the derivation of a fundamental relation in bar network diacoptics was presented. Finally the relative time saving to be achieved by the application of this method was estimated.

Über die Netzwerktheorie der Stabkonstruktionen. Die Arbeit behandelt die netzwerktheoretische Formulierung der Statik von Stabträgersystemen. Es wird gezeigt dass die Netzwerkanschauung einen tieferen Einblick in diese Problematik ermöglicht. Die Untersuchung richtet sich der bisher noch wenig angewandten diakoptischen Methoden zu und gibt die Ableitung einer grundlegenden Beziehung der Diakoptik von Stabträgersystemen. Es wird schliesslich eine Abschätzung der mittels dieser Methode erzielbaren Rechenzeitverminderung gegeben.

RÚDSZERKEZETEK STABILITÁSVIZSGÁLATA

GÁSPÁR ZSOLT*

[Beérkezett 1971. augusztus 9-én]

A rúdszerkezetek nagy elmozdulásokra is érvényes állapotváltozási differenciálegyenletéből kiindulva levezetjük az egyparaméteres teherhez tartozó állapotváltozási differenciálegyenletet. E differenciálegyenlet homogén része a rúdszerkezet állapotváltozásának elágazási pontjánál oldható meg. A differenciálegyenlet együtthatómátrixának blokkjait a másodrendű elmélet segítségével közelítjük, és így egy direkt sajátértékfeladatra jutunk. Végül egy interpolációs eljárást közlünk, melynek segítségével a kritikus teher paraméterét tetszőleges pontossággal meg lehet határozni.

1. Bevezetés

Célunk a rúdszerkezetek egyparaméteres állapotváltozása elágazási pontjának meghatározása. A feltett kérdésre a választ a rúdszerkezet egyparaméteres teréhez tartozó

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{G}^* \\ \mathbf{G} & \mathbf{F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{u} \\ d\mathbf{s} \end{bmatrix} + dR \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ 0 \end{bmatrix} = 0$$

állapotváltozási differenciálegyenlet homogén része megoldhatóságának

$$\begin{vmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{G}^* \\ \mathbf{G} & \mathbf{F} \end{vmatrix} = 0$$

feltétele adja meg. Az egyenletet — egyparaméteres terhet feltételezve — a [2]-ben bemutatott, a nagy elmozdulásokra is érvényes differenciálegyenletből kiindulva vezetjük le. A differenciálegyenlet együtthatómátrixának blokkjait a másodrendű elmélet használhatóságát feltételezve az elágazási pont közelében levő, ismert stabil állapotból kiindulva közelítjük, és így egy — a kiindulási stabil állapot skalár paraméterétől is függő — direkt sajátértékfeladatra jutunk. A legkisebb sajátérték a kritikus teher nagyságát, a hozzá tartozó sajátvektor a kihajlási alakot adja meg. Végül egy interpolációs eljárást közlünk, amelynek segítségével a kritikus teher paraméterét tetszőleges pontossággal meg lehet határozni.

* Gáspár Zsolt, Budapest XI., Kelenföldi u. 35/a

2. Az állapotváltozás elágazási pontját meghatározó differenciálegyenlet

A rúdszerkezetet az [1]-ben definiált rúdelemekkel közelítjük, így nagy elmozdulások esetén is érvényes a [2]-ben levezetett

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{G}^* \\ \mathbf{G} & \mathbf{F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{u} \\ d\mathbf{s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d\mathbf{q} \\ d\mathbf{t} \end{bmatrix} = 0 \tag{1}$$

differenciálegyenlet, ahol

$$\mathbf{D} = \left[\frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial \mathbf{u}} \mathbf{s} \right].$$

A vizsgálat során feltételezzük, hogy a szerkezet nagy elmozdulásokat szenved, tehát a geometriája is megváltozik, így a mindenkori G az alaphelyzethez viszonyított elmozdulások függvénye

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}(\mathbf{u}).$$

A szerkezet hajlékonysági mátrixa általános esetben az elmozdulásoknak és a feszültségeknek is függvénye

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}(\mathbf{u}, \mathbf{s}),$$

de az alábbi összefüggések levezetésénél feltételezzük, hogy a szóbajövő állapotváltozási tartományban

$$\mathbf{F} = \text{const.}$$

Vizsgálataink egyparaméteres teherre vonatkoznak, tehát a teher

$$\mathbf{q} = R\mathbf{f},$$
$$\mathbf{f} = \text{const.}$$

alakban írható, ahol f állandó vektor is lehet, azonban általánosságban feltételezzük, hogy az elmozdulások egyértékű függvénye

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{u}).$$

Egyparaméteres teher esetén a teher infinitezimálisan kicsiny megváltozása során a

$$\mathbf{G}^* \mathbf{s} + R\mathbf{f} = 0, \tag{2}$$
$$(\mathbf{G}^* + d\mathbf{G}^*)(\mathbf{s} + d\mathbf{s}) + (R + dR)(\mathbf{f} + d\mathbf{f}) = 0$$

egyensúlyi egyenletek érvényesek, amelyek összevonása után (a $d\mathbf{G}^* d\mathbf{s}$ tag elhanyagolásával),

$$d\mathbf{G}^* = \frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial \mathbf{u}} d\mathbf{u},$$

$$d\mathbf{f} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} d\mathbf{u}$$

összefüggéseket felhasználva és a ($d\mathbf{t} = 0$ feltételezéssel élve)

$$\mathbf{G}\, d\mathbf{u} + \mathbf{F}\, d\mathbf{s} = 0 \tag{3}$$

kinematikai egyenletet figyelembe véve előállíthatjuk az *egyparaméteres teherhez tartozó állapotváltozási differenciálegyenletet*:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{G}^* \\ \mathbf{G} & \mathbf{F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{u} \\ d\mathbf{s} \end{bmatrix} + dR \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ 0 \end{bmatrix} = 0, \tag{4}$$

ahol

$$\mathbf{D} = \left[\frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial \mathbf{u}} \mathbf{s} \right] + R \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}}.$$

Vizsgálataink célja az állapotváltozás elágazásának meghatározása. Más szóval meghatározandónak tekintjük az $\mathbf{u}(R)$, $\mathbf{s}(R)$ térgörbe R paraméterrel jellemzett azon pontját, amelynek közvetlen szomszédságában (infinitezimális közelségében) létezik változatlan R paraméter értékhez tartozó $\mathbf{u} + d\mathbf{u}$, $\mathbf{s} + d\mathbf{s}$ állapotjellemzőkkel leírható egyensúlyi állapot. Az elágazási pontban tehát a (4) egyenlet $dR = 0$ differenciál mellett kielégül. A rúdszerkezet állapotváltozásának elágazási pontját így a

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{G}^* \\ \mathbf{G} & \mathbf{F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{u} \\ d\mathbf{s} \end{bmatrix} = 0 \tag{5}$$

homogén differenciálegyenlet határozza meg.

Ezzel a feladat elvileg megoldottnak tekinthető, mert a keresett R értéket a

$$\begin{vmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{G}^* \\ \mathbf{G} & \mathbf{F} \end{vmatrix} = 0 \tag{6}$$

karakterisztikus egyenlet szolgáltatja. Azonban (6) az R-et implicite tartalmazza, ezért elméletileg úgy kell eljárni, hogy (4)-et integrálva — azaz $\mathbf{x}(R) = [\mathbf{u}(R), \mathbf{s}(R)]$ állapotváltozási térgörbét előállítva — keressük, hogy (6) egyenletet milyen R-től függő $\mathbf{D}$, $\mathbf{G}$ elégíti ki.

A vázolt gondolatmenetből kitűnik, hogy a (4) differenciálegyenlet együttható mátrixa az elágazási pont közvetlen környezetében rosszul kondicionálttá válik, ezért közönséges iterációval nem lehet az elágazási ponthoz tartozó R paraméterértéket meghatározni. Ellenben járható útként kínálkozik az elágazási pont véges környezetére épített interpoláció, melyre vonatkozó — gyakorlatilag használható és kipróbált — algoritmust a következő két pontban mutatjuk be.

Ha feltételezhetjük, hogy

$$\mathbf{F} \neq 0,$$

az (5) differenciálegyenlet alsó egyenletéből $d\mathbf{s}$ kifejezhető

$$d\mathbf{s} = -\mathbf{F}^{-1}\mathbf{G}\,d\mathbf{u}.$$

Ez behelyettesítve az (5) összefüggés felső egyenletébe, az *elágazási ponthoz tartozó sajátértékfeladatot*

$$(\mathbf{D} - \mathbf{G}^*\mathbf{F}^{-1}\mathbf{G})\,d\mathbf{u} = 0$$

formában, vagy a $\mathbf{D}$ részletezésével

$$\left(\left[\frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial \mathbf{u}}\mathbf{s}\right] + R\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} - \mathbf{G}^*\mathbf{F}^{-1}\mathbf{G}\right) d\mathbf{u} = 0 \tag{7}$$

formában is leírhatjuk.

Ebben az egyenletben a második tag tényezőként is tartalmazza az R sajátértéket, míg a többi tag csak közvetve, tehát $\mathbf{f} = \text{const.}$ esetben a

$$\left(\left[\frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial \mathbf{u}}\mathbf{s}\right] - \mathbf{G}^*\mathbf{F}^{-1}\mathbf{G}\right) d\mathbf{u} = 0$$

elfajult sajátértékfeladatot kapjuk.

3. Az együtthatómátrix meghatározása

A (7) összefüggésben szereplő mátrixok és vektorok az R paraméter függvényei, így az R-rel együtt ismeretlenek, tehát segítségükkel egyelőre nem határozhatjuk meg a kritikus teher paraméterét. Ezért feltételezzük, hogy ismert a stabil állapotváltozási szakasznak egy olyan, R_i paraméterhez tartozó $\mathbf{u}_i$, $\mathbf{s}_i$ állapotvektora, mely „elég közel" van az R paraméterrel jellemezhető $\mathbf{u}$, $\mathbf{s}$ állapotvektorhoz. Elég közelinek akkor nevezzük a két állapot-

vektort, ha az egész $[R_i, R]$ zárt intervallumban előírt pontossággal teljesülnek a következő feltételek:

a) a **G** mátrix megváltozása az elmozdulásvektor lineáris függvényének tekinthető

b) a **G** mátrix és az **f** vektor derivált tenzora konstansnak vehető

c) az elmozdulásvektor növekményét több tényezőként tartalmazó tagok elhanyagolhatóak a többi taghoz képest.

Tehát a feltételezésünk szerint ismert a

$$\mathbf{G}_i^* \mathbf{s}_i + R_i \mathbf{f}_i = 0$$

egyensúlyi egyenlet, valamint a

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{s}_i &= \mathbf{s} \quad \mathbf{s}_i, \\ \Delta \mathbf{u}_i &= \mathbf{u} \quad \mathbf{u}_i, \\ \Delta R_i &= R - R_i \end{aligned} \tag{8}$$

jelölések felhasználásával a másodrendű elméletnek megfelelően a (4) differenciálegyenletet differenciaegyenletként írva érvényes a

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D}_i & \mathbf{G}_i^* \\ \mathbf{G}_i & \mathbf{F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u}_i \\ \Delta \mathbf{s}_i \end{bmatrix} + \Delta R_i \begin{bmatrix} \mathbf{f}_i \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \tag{9}$$

összefüggés, ahol

$$\mathbf{D}_i = \left[\frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial \mathbf{u}} \bigg|_{\substack{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i \\ \mathbf{s}_i}} \right] + R_i \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i}.$$

A (9) egyenletből $\Delta \mathbf{s}_i$ és $\Delta \mathbf{u}_i$ kifejezhető

$$\Delta \mathbf{s}_i = -\mathbf{F}^{-1} \mathbf{G}_i \Delta \mathbf{u}_i. \tag{10}$$

$$\Delta \mathbf{u}_i = (\mathbf{G}_i^* \mathbf{F}^{-1} \mathbf{G}_i - \mathbf{D}_i)^{-1} \mathbf{f}_i \Delta R_i.$$

A

$$\mathbf{H} = \mathbf{G}_i^* \mathbf{F}^{-1} \mathbf{G}_i - \mathbf{D}_i$$

jelöléssel

$$\Delta \mathbf{u}_i = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{f}_i \Delta R_i, \tag{11}$$

és ezt felhasználva, a (10) egyenletben a

$$\Delta \mathbf{s}_i = -\mathbf{F}^{-1} \mathbf{G}_i \mathbf{H}^{-1} \mathbf{f}_i \Delta R_i \tag{12}$$

összefüggést kapjuk. Az R paraméterhez tartozó G feltételezésünk szerint felírható

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}_i + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i} \Delta \mathbf{u}_i \tag{13}$$

alakban.

A (7) sajátértékfeladat a (8) és (13) összefüggések alapján — mivel a derivált tenzorokat konstansnak tekintjük —

$$\left(\left[\frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i}(\mathbf{s}_i+\Delta \mathbf{s}_i)\right]+R\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i}-\right.$$
$$\left.\left(\mathbf{G}_i^*+\frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i}\Delta \mathbf{u}_i\right)\mathbf{F}^{-1}\left(\mathbf{G}_i+\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i}\Delta \mathbf{u}_i\right)\right) d\mathbf{u}=0$$

alakú lesz. Ebbe az egyenletbe behelyettesítve a (11) és (12) összefüggéseket — feltételezésünk alapján elhanyagolva a $\Delta \mathbf{u}_i$ vektort két tényezőként tartalmazó tagot — kapjuk

$$\left(\left[\frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i}\mathbf{s}_i\right]-\left[\frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i}(\mathbf{F}^{-1}\mathbf{G}_i\mathbf{H}^{-1}\mathbf{f}_i)\right]\Delta R_i+R\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i}-\right.$$
$$-\mathbf{G}_i^*\mathbf{F}^{-1}\mathbf{G}_i-\mathbf{G}_i^*\mathbf{F}^{-1}\left(\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i}(\mathbf{H}^{-1}\mathbf{f}_i)\right)\Delta R_i-$$
$$\left.-\left(\frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i}(\mathbf{H}^{-1}\mathbf{f}_i)\right)\mathbf{F}^{-1}\mathbf{G}_i\Delta R_i\right)d\mathbf{u}=0.$$

Ez az egyenlet, ha bevezetjük a

$$\mathbf{D}_1=-\mathbf{G}_i^*\mathbf{F}^{-1}\mathbf{G}_i$$
$$\mathbf{D}_2=-\left(\frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i}(\mathbf{H}^{-1}\mathbf{f}_i)\right)\mathbf{F}^{-1}\mathbf{G}_i$$
$$\mathbf{D}_3=\left[\frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i}\mathbf{s}_i\right]$$
$$\mathbf{D}_4=-\left[\frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i}(\mathbf{F}^{-1}\mathbf{G}_i\mathbf{H}^{-1}\mathbf{f}_i)\right]$$
$$\mathbf{D}_5=\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_i}$$

jelöléseket, akkor

$$(\mathbf{D}_1+\mathbf{D}_3+(\mathbf{D}_2+\mathbf{D}_2^*+\mathbf{D}_4)\Delta R_i+\mathbf{D}_5 R)\,d\mathbf{u}=0$$

alakú lesz. (Ez az egyenlet a $\mathbf{D}_2^* \Delta R_i d\mathbf{u}$ tag kivételével megegyezik a [3] 259. oldalán található egyenlettel. A különbség a levezetésben szereplő eltérő elhanyagolásokból származik.) Felhasználva a

$$\Delta R_i = R - R_i$$

összefüggést, az

$$\mathbf{A} = \mathbf{D}_1 + \mathbf{D}_3 - R_i(\mathbf{D}_2 + \mathbf{D}_2^* + \mathbf{D}_4),$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{D}_2 + \mathbf{D}_2^* + \mathbf{D}_4 + \mathbf{D}_5$$

jelölések alkalmazásával az

$$(\mathbf{A} + R\,\mathbf{B})\, d\mathbf{u} = 0 \tag{14}$$

általánosított sajátértékfeladatot kapjuk, melyben az R sajátérték a kritikus teher paraméterét adja, a $d\mathbf{u}$ sajátvektor pedig a kihajlási alak affin képét határozza meg.

4. A stabilitásvizsgálat menete

A sajátértékfeladat levezetésekor feltételeztük, hogy a kritikus teher megfelelő közelségében levő R_i paraméterhez tartozó állapotvektort ismerjük. A megfelelő R_i paraméter meghatározását iterációs úton végezzük. A sajátértékfeladatban levő mátrixok, és így a sajátérték az R_i paraméter függvényei

$$R = f(R_i).$$

Az elágazási ponthoz tartozó teher paraméterét e függvény görbéjének és az

$$R = R_i$$

egyenletű egyenesnek a metszéspontja szolgáltatja, mivel itt a

$$\Delta R_i = 0$$

miatt a feltételeink teljesülnek. A metszéspont meghatározására a következő módszert javasoljuk. Ha az állapotváltozás stabil szakaszán egy R_i paraméterhez tartozó állapotvektor ismert (kiinduláskor esetleg a terheletlen állapot), akkor ez R_i paraméterrel kiindulva megoldjuk a (14) sajátértékfeladatot, amely az $f(R_i)$ értéket szolgáltatja. Ha

$$\text{abs}\left(f(R_i) - R_i\right) > \varepsilon$$

(ε az előírt pontosságtól függő állandó), akkor a nagy elmozdulások elmélete segítségével meghatározzuk az

$$R_{i+1} = R_i + \Delta R \leq f(R_i)$$

paraméterhez tartozó állapotvektort, és az egész eljárást megismételjük.

IRODALOM

1. Szabó, J.—Rózsa, P.: Die Matrizengleichung von Stabkonstruktionen. *Acta Techn. Hung.* **71.** (1.—2.) (1971).
2. Szabó, J.—Rózsa, P.: Grosse Verschiebungen von Stabkonstruktionen. *Acta Techn. Hung.* **73.** (1.—2.) (1972).
3. Szabó, J.—Roller, B.: Rúdszerkezetek elmélete és számítása. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1971, p. 266.

Stability Test of Bar Structures. Starting from the differential equation of the state variation of large bar structure displacements, the differential equation of the state variation pertaining to single-parameter loading is derived. The homogeneous part of this differential equation can be solved with respect to the branch point of the bar structure state variation. The coefficient matrix block of the differential equation is approached by the second order theory, whereby a direct eigenvalue problem is arrived at. Finally, an interpolation process is presented which leads to the optional accurate determination of the critical load parameter.

Stabilitätsprüfung von Stabkonstruktionen. Im folgenden wird von der auch für große Verschiebungen von Stabkonstruktionen gültigen Differentialgleichung der Zustandsänderung ausgehend, die der einparametrigen Last zugeordnete Differentialgleichung der Zustandsänderung abgeleitet. Der homogene Teil dieser Differentialgleichung kann am Abzweigungspunkt der Zustandsänderung der Stabkonstruktion gelöst werden. Die Blöcke der Koeffizientenmatrix der Differentialgleichung können mit Hilfe der Theorie zweiter Ordnung angenähert werden, wodurch man zu einem direkten Eigenwertproblem gelangt. Schließlich wird ein Interpolationsverfahren angeführt, mit dessen Hilfe der Parameter der kritischen Last mit beliebiger Genauigkeit bestimmt werden kann.

KÖNYVSZEMLE

Bogárdi János

VÍZFOLYÁSOK HORDALÉKSZÁLLÍTÁSA

Akadémiai Kiadó, Budapest 1971. 837 oldal

A tudomány specializálódásának következménye, hogy a néhány évtizede egyetlen kézikönyvben is összefoglalható vízépítési, illetve hidraulikai ismereteknek — ha azok mélységeibe kívánunk hatolni — ma már egyes részeiről is jelentős önálló munkákat kell megjelentetni. Ennek egyik szép példája a *Vízfolyások hordalékszállítása* című összefoglaló mű, amelyben a szerző még 837 oldal terjedelem mellett is kénytelen volt bizonyos fokig leszűkíteni tárgykörét, hogy a legfontosabb kérdésekben valóban átfogó és kellően részletes ismereteket adhasson. Így csak általánosságban foglalkozik a hordalékmozgás és folyószabályozás kapcsolataival és a tározók feltöltésével, valamint a műtárgyak közelében fellépő kimosásokkal, valamint a hordalékmérésekkel.

Az új mű a szerző 1954—55-ben írt *A hordalékmozgás elmélete* című könyvének tárgyát ilyen értelemben leszűkíti és az azóta eltelt időbeli fejlődésnek megfelelően mélységében jelentősen továbbfejleszti. A könyv igen nagy érdeme, hogy a szerző *saját kutatásain alapuló egyéni szemléletét szerencsésen ötvözi össze a bőséges világirodalom tapasztalataival*, ugyanakkor ez utóbbit mindig megfelelő bírálat alá veszi és így egységes képbe foglalja össze a sokszor egymásnak ellentmondónak látszó elméleteket. Ennek a szemléletnek az alapja *a szabatos fizikai leírásmód*, amelyet mindenütt igyekszik megvalósítani.

A könyv jelentősége túlmegy a hordalékszállítás témakörén, mivel az általános transzportegyenlet alkalmazásával szép példát mutat arra, hogy egy más tudományág területén elért elméleti eredmények milyen sikerrel alkalmazhatók ebben az esetben a hordalékszállításra, de ugyanakkor egyéb hidraulikai jelenségekre is.

A számos külföldi eredmény ismertetése és a megfelelő irodalmi hivatkozás alkalmassá teszik a könyvet, hogy a különleges részterületek iránt érdeklődők *alapvető forrásműként* kezeljék, nemcsak hazánkban, hanem szerte a világon. Az ismertetett művek gondos megválogatásában jelentős szerepe van a szerző széles körű nemzetközi ismereteinek és személyes kapcsolatainak, valamint annak, hogy egyes kérdéseket szóban, vagy írásban az idézett tanulmányok szerzőivel külön is megtárgyalt.

Külön érdeme a műnek — főleg a hordalékmozgással foglalkozó kutatók és kísérletezők számára, — hogy *a hidraulikai hasonlóság kérdését új nézőpontból alaposan boncolja*. A mozgómedrű vízfolyások modelltörvényeinek összefoglalása, részben a szerző saját eredményeinek segítségével, beleértve a torzított modelleket is, hézagpótló alkotás. A mérlegegyenletek ilyen alkalmazása világviszonylatban új.

A szerző nem állt meg a módszerek általános ismertetésénél és vizsgálatánál, hanem az általa kezdeményezett hazai hordalékmérések alapján a Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet eredményeire támaszkodva részletesen ismerteti *a magyar folyók hordalékszállítási viszonyait* és a hordalékszállítás számszerű jellemzőit.

A könyv tartalmát tekintve három főrészre oszlik éspedig a hordalékmozgás elméletét, a hordalék és a vízfolyás kapcsolatát, végül a magyarországi hordalék vizsgálatokat tárgyaló főrészre. Az első főrész a legbővebb és 460 oldal terjedelmű, a második 220, a harmadik kereken 100 oldal. Az irodalomjegyzék további 20 oldalt foglal el.

Az első főrészen felül a hordalékra és annak mozgására vonatkozó vizsgálatok alapjait, a görgetett és lebegtetett hordalékmozgás elméleteit ismerteti. A görgetett hordalék mozgásával kapcsolatban kiemelendők a változó kritikus hordalékmozgató erők és a változó kritikus sebességek törvényei, amelyek a szerző új kutatási eredményei. A lebegtetett hordalékmozgást elsőként vizsgálja az általános mérlegegyenletek segítségével.

A második főrészben a tapasztalati összefüggéseket, a hordalék és a vízfolyás hidraulikai tényezőit, a rezsim-elméletet, a hordalékmozgás és folyószabályozás kapcsolatát, valamint

a hordalékmozgás hidraulikai hasonlósági törvényeit tárgyalja. Elméleti szempontból ez a hasonlósági vizsgálat a legjelentősebb, mert itt tárgyalja a hordalékos vízfolyások hasonlóságát biztosító feltételi egyenletekhez világviszonylatban először a mérlegegyenletekből származtatott összefüggéseket.

A harmadik főrészben a magyar hordalékmérések és kutatások történeti képét adja és eredményeiket foglalja össze. A magyar folyók hordalékszállítását – egyúttal példaként is – mérési adatok alapján az adatfeldolgozás, értékelés és ábrázolástechnika szempontjából mutatja be. Főként a Dunára és a Tiszára helyezi a súlyt, de foglalkozik a Rába, Zala, Szamos, Sajó, Hernád, Fekete-Körös, Sebes-Körös, Berettyó és a Maros hordalékszállításával is. Ez a főrész önálló könyvként is megállná helyét. Elsősorban a hazai tervezők és folyószabályozók forgathatják eredménnyel, de nemzetközi vonatkozásban is jelentős, mivel a külföldi vízfolyások hordalékszállítása a közölt adatokkal összehasonlítható és így az adatok felhasználhatók módszerek ellenőrzésére. Ez pedig *törvényszerűségek általánosíthatóságát* teszi lehetővé.

A könyvet sikerrel forgathatják a folyószabályozással foglalkozó vízépítő mérnökök körén túl a víztisztítással foglalkozó mérnökök, illetve a geológusok és geográfusok, valamint a hidraulikai modell-kísérletezők.

A könyv egyik hagyományos magyar tudományos tevékenységről, az alluviális folyómedrek vizsgálatáról mutat be újabb jelentős, nemzetközi sikerekre igényt tartó eredményeket. Ezért örömmel üdvözölhető az az elhatározás, hogy az Akadémiai Kiadó a Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet támogatásával angol nyelven is kiadja.

A könyv mintaszerű kiállítása az Akadémiai Nyomdát dícséri.

Dr. Starosolszky Ödön

BETONTECHNISCHE BERICHTE 1970

Beton-Verlag GmbH Düsseldorf

A kiadvány szerkesztője Prof. Dr. Ing WALZ a düsseldorfi Cementipari Kutatóintézet 1970-ben kifejtett kutatási tevékenységét foglalja össze, kísérleti eredményekre és irodalmi adatokra támaszkodva.

A vizsgálatok általában a szabályzatok korszerűsítését szolgálják. A bányászatban alkalmazott cement szuszpenziók és injektáló habarcsok különleges technológiai követelményeit és anyagjellemzőit mutatja be a DIN 4093 kiegészítésére vonatkozó javaslat. Fontosabb megállapításai, hogy a minőséget elsősorban a viszkozitási és ülepedési tulajdonságok határozzák meg, a vízcement-tényező másodrendű jelentőségű.

A vízzáró és kőzetstabilizáló injektáló anyagok összetételét a feladatnak megfelelően előkísérletekkel kell megállapítani.

A PVC termékek, 120 °C feletti hevítésénél sósav gőz képződik, amely a fémek és a betonok korrózióját idézi elő. A PVC gőzök behatolnak a beton testbe, mérési adatok alapján 5 ÷ 10 mm mélységig. A védekezés módja a beton különleges összetételének előírása és a gondos bedolgozás.

A beton mechanikai tulajdonságainak alakulását igen alacsony (−150°, −200 °C) hőmérsékleten, a cseppfolyós gázok tárolására épített tartályok oldalfalán figyelték meg. A kapcsolódó kísérletek igazolták, hogy a beton rugalmassági modulusa ilyen alacsony hőmérsékleten háromszorosára, hőátbocsátási tényezője kétszeresére is megnőhet, míg hőtágulási együtthatója felére csökken. A vasbeton szerkezeteken káros repedéseket nem észleltek, hirtelen hőmérsékletváltozás esetében sem.

A fagyállóság mértékére megbízható képet ad a légpórusok közötti távolság, amely POWERS eljárása alapján határozható meg.

A Cementipari Kutatóintézet jelentése a beton húzószilárdságának alakulásáról számol be az utókezelés és a nedvességtartalomtól függően. Átlagosan 10%-kal növelhető a húzószilárdság nedves állapotban történő pihentetés esetében.

A cementkő és a beton rugalmassági modulusának meghatározására egységes vizsgálati módszer nincs. Általában a pillanatnyi alakváltozásból vezetik le a rugalmassági modulus értékét korrelációs képletek segítségével. E módszer azonban nem bizonyult megbízhatónak. A beton, mint két alapanyagú modell, lehetővé teszi a regressziós összefüggések eredményes alkalmazását a dinamikus rugalmassági modulus meghatározásánál. A statikus és a dinamikus rugalmassági modulus viszonyszámát a cementkő pórus térfogata és az adalék szemszerkezete befolyásolja. Figyelemre méltó a kísérletek gondos előkészítése és korszerű műszerezettsége.

A mintegy 15 éve összeállított vízcement-tényező és betonszilárdság diagramok is revízióra szorulnak. A lyukkártya rendszerben összefoglalt adatok alapján megállapítható, hogy a szabvány diagramok nem alkalmasak a keverés arányainak meghatározására.

A nagy tömegű betonépületek belső hőmérsékletének megállapítására új betonkalorimétert szerkesztettek. A hidratációs hő mérésével több intézet foglalkozik. A tapasztalatokat egyeztetik és javaslatot tesznek a vizsgálati módszerek egységesítésére és a szabályozásra vonatkozóan.

A kiadvány tudósít a prágai 6. FIP. kongresszusról és összefoglalja a beton tervezéssel és kivitelezésssel összefüggő fontosabb kutatásokat 1960-tól 1970-ig.

Dr. Goschy Béla

BETON-KALENDER 1971

TASCHENBUCH FÜR BETON- UND STAHLBETONBAU UND DIE VERWANDTEN FÄCHER

Verlag von Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin—München—Düsseldorf, 60. Jahrgang. I. rész: 1312 old., II. rész: 816. old.

A *Beton-Kalender* immár 60 év óta a beton- és vasbeton szakma standard kézikönyve. Szerkesztője Prof. Dr. Ing. G. FRANZ, a karlsruhei műegyetem neves professzora, a beton- és vasbetonépítés világszerte ismert kiváló szakértője. Szerzői a szakma élvonalban álló tudósai.

Ebben a zsebkönyvben megtalálja a beton és vasbetonépítés területén dolgozó szakember mindazokat az adatokat és szabályokat, amelyekre mindennapi munkája során szüksége van, s ami a fő, mindezt közérthető előadásban, kellő magyarázatokkal kísérve. Különösen értékessé teszi e zsebkönyvet az a körülmény, hogy benne minden adat a folyton fejlődő tudomány legújabb megállapításaihoz igazodik.

A zsebkönyv *I. részében* új a Szilárdságtan című fejezet (szerzője: Prof. W. DIMITROV, Karlsruhe) a korábbi évfolyam Szilárdságtan fejezeténél bővebben (több mint kétszeres terjedelemben) modern felfogásban tárgyalja a szilárdságtannak főleg a vasbetonépítészettel kapcsolatos kérdéseit, többek közt a vasbetonlemezek töréselméletét.

Ugyanitt a vasbeton szerkezeti elemek méretezésével foglalkozó fejezet (szerzői: Dr.-Ing. E. GRASSER, München, valamint Prof. Dr.-Ing. K. KORDINA és Dr.-Ing. V. QUAST, Braunschweig). Az új *n*-mentes méretezési elven alapuló keresztmetszetszámítást, valamint a kihajlási biztonság kérdését tárgyalja. E sok ábrával illusztrált fejezetek a szorosan vett méretezési szabályokon kívül kellő magyarázat és példaanyag kapcsán ismertetik a valósághoz közelálló feltevéseken alapuló új számítási eljárásokat.

Különösen hasznos tájékoztatást jelent a vasbeton szakma részére az *I. rész Függeléke*, amely az új német vasbetonszabályzat tervezetet (DIN 1045) tartalmazza. Ez a szabályzat a biztonság korszerű értelmezéséből kiindulva a megengedett igénybevételek helyett a határállapot jellemzőire támaszkodva állapítja meg a méretezés szabályait, s ezzel a régi szabályzattal szemben jelentős lépést tesz előre a racionális méretezés irányában. Természetesen az új *n*-mentes számítási eljárás bevezetése a régi *n*-es számítási elven alapuló szemlélettel szemben számos fogalom és szabály átértékelését teszi szükségessé. A kézikönyv e tekintetben is híven igazodik a változott igényekhez.

A *kézikönyv II. részében* általános érdeklődésre tarthat számot a vasbetonszerkezetek vasalásával foglalkozó fejezet (szerzője: Prof. Dr.-Ing. F. LEONHARDT, Stuttgart). Ez a fejezet gazdag gyakorlati tapasztalatokra támaszkodva, bőséges ábraanyag kíséretében foglalja össze a vasbetonszerkezetek helyes vasalásának szabályait és a helytelen vasalás következményeit.

A *II. rész Függeléke* az Egyesült Államok vasbetonszabályzatát ismerteti, mégpedig kg és cm-re átszámított adatokkal, ami e szabályzat helyes értelmezését nagymértékben megkönnyíti.

Összefoglalásként megállapítható, hogy a *Beton-Kalender* 1971-es évfolyama régi hírnevéhez méltó kitűnő szakkönyv, mely gazdag adat- és ismeretanyagával értékes segítséget nyújt a tervezés, méretszámítás és kivitelezés különböző problémáinak megoldásához, s mint ilyen, világszerte komoly érdeklődésre tarthat számot.

Dr. Csonka Pál

COSTRUZIONI IN CEMENTO ARMATO

STUDI E RENDICONTI

Italcementi 1971. Milano, p. 230

A milánói Műszaki Egyetem évenként egy vagy két kiadványt ad ki a vasbeton szerkezetek fejlesztése céljából, „Vasbetonszerkezetek, tanulmányok és beszámolók" címmel. A legújabb kötet a következő tanulmányokat tartalmazza:

C. AVRAM: A beton húzószilárdsága hajlításnál. (Francia nyelven)
L. CONTI: Különféle szerkezetű betonok zsugorodása és lassú alakváltozása egy új szerkezeti modell alapján. (Olasz nyelven)
V. FRANCIOSI: A virtuális munka elvének alkalmazása csavarás előfordulása esetén. (Olasz nyelven).
P. GAMBAROVA—A. ASCHEDAMINI: Előrefeszített szerkezetek feszültségoptikai vizsgálata. Vierendeel tartó feszültségmegoszlása és legelőnyösebb előrefeszítése. (Angol nyelven).
F. MORTINEZ—J. CABRERA—G. MENDITTO: A pályafelület egyenlőtlenségeinek hatása sorozatos mozgó teherrel terhelt hidak pályalemezére. (Angol nyelven.)
G. MENDITTO: A pályafelület egyenlőtlenségének dinamikai hatása az anizotróp pályalemezekre rugós tengelyű vonatok esetén. (Olasz nyelven) .
A. MIGLIACCI—A. ARANZINI: Előregyártott lemezek és panelek keresztirányú tehermegoszlására vonatkozó elméleti és kísérleti vizsgálatok. (Olasz nyelven.)
A. MIGLIACCI—G. GEROSA: Magas vasbeton kémények néhány szerkezeti problémája. (Olasz nyelven).

A felsorolt tanulmányok magas színvonalú elméleti és kísérleti eredményekről számolnak be.

Dr. Szmodits Kázmér

Volkmar Kussl

DATENVERARBEITUNG MIT PL/1

EINE EINFÜHRUNG IN DAS PROGRAMMIEREN FÜR INGENIEURE UND ORGANISATIONSFACHLEUTE

VDI – TASCHENBÜCHER, T 12.

VDI-Verlag, Düsseldorf 1971, 170 old.

Aki a számítógépet meg akarja érteni, annak meg kell ismerkednie valamelyik programozási nyelv rendszerével, logikájával is. Ha pedig egy számítógépen dolgozni akarunk, akkor már többé-kevésbé tudnunk kell használni egy olyan nyelvet, amelyet a rendelkezésünkre álló számítógép is megért. Ha új programot akarunk írni, vagy meglevő programot átalakítani, akkor annak nyelvét igen jól kell ismernünk.

A számítógép „*anyanyelve*" a gépi nyelv (gépi kód), amely azonban gyár és géptípus szerint változik, és amelyen a programozási munka a legfáradságosabb. Előnye viszont, hogy ezt a nyelvet a gép közvetlenül megérti és memóriáját nem kell fordító programokkal terhelnie. Az ember és a számítógép közötti párbeszéd megkönnyítése céljából kezdték kialakítani a géptípustól független, *feldolgozás-orientációjú* nyelveket. A feldolgozás (a műszaki, tudományos számítások vagy a számviteli, pénzügyi, kereskedelmi stb. ügyvitel) területén általánosan használható, géptől független nyelveket szokták *algoritmikus* (vagy magasabb szintű) nyelveknek nevezni. A PL/1 (Programming Language 1) ezek között is különleges helyet foglal el, mivel ebben a nyelvben az IBM cég a harmadik generációs gépek megjelenésével egyidejűen a két nagy feldolgozási terület általuk kifejlesztett nyelvi reprezentánsainak, a FORTRAN-nak és a COBOL-nak előnyeit kívánta egyesíteni, és így ez a nyelv mind a bonyolult számítások, mind az ügyviteli folyamatok gépi programozására felhasználható. Bár a gépi nyelvre történő fordításhoz szükséges és így a géptípusok anyanyelvétől függően különböző fordító programok kidolgozásának késedelme miatt a PL/1 meglehetősen lassan kezdett elterjedni, az IBM 360 típusú gépeknél már egyre inkább használják és előreláthatólag a szocialista országok tervezett egységes számítógép-rendszerében is készül PL/1 fordítóprogram. A PL/1 egységes rendszerbe ötvözi a bonyolult számítási és a legegyszerűbb adatfeldolgozási utasításokat is, de elsajátítása az alkalmazási terület igényeire korlátozottan is lehetséges.

Szerző könyvében ügyesen domborítja ki e programozási nyelv előnyeit. Amint az előszóban írja, a PL/1 nemcsak egy programozási nyelv, hanem az adatfeldolgozásról, számítástechnikáról alkotott mai ismereteinknek egy „katalógusa" is. Ezenkívül a legjobban illeszkedik a modern számítógépek tulajdonságaihoz, munkamódszeréhez. Ugyanakkor elismeri, hogy az ALGOL, COBOL és FORTRAN nyelvek nélkül a PL/1 nem születhetett volna meg.

A könyv három részre tagozódik:

A) nyelvtechnikai rész,
B) algoritmikus rész, és
C) programozás-technikai rész.

A *nyelvtechnikai rész* 1. fejezete a programozási nyelvekkel és az adatfeldolgozás folyamatával általánosságban foglalkozik. Ezt követik a PL/1 nyelv alapelemei, a szó fogalma és szerkezete, a szám- és jelábrázolás kérdései, az adatok csoportosítása, majd a PL/1 nyelv matematikai, logikai kifejezései, a bit- és a jelláncokon végzendő műveletek. A 7., 8. és 9. fejezetek a kijelentés formájú felszólító és szervező-irányító utasításokkal, valamint az ember és a gép közötti párbeszéd információival, a deklarációkkal, az adattömbök és egyebek hivatkozásaival foglalkozik. Ez a rész 36 gyakorló feladattal zárul.

Az *algoritmikus rész* az input-output műveletekkel, vagyis az adatbevitellel és kiírással, a program-elágaztatásokkal, megszakításokkal, a programon belüli ciklusokkal, az összetartozó adattömegeken végzendő műveletekkel (rendezés, csoportosítás, módosítás, keresés stb.), az eljárásokkal, ill. szubrutinokkal, vagyis a különféle nagyobb programok részeként gyakran használt algoritmusok programjaival, azoknak a főprogramba történő beillesztésével, valamint a PL/1 nyelven írt forrásprogram gépnyelvi fordításainak problémáival foglalkozik, majd végül a 8. fejezetben összefoglalja a PL/1 feldolgozási szabályait, utasításrendszerét.

A *programozás-technikai rész* a külső memóriákban tárolt törzsgárdaállomány-csoportok (angolul: file) szervezésének, karbantartásának, beírásának és felhasználásának, majd általában a memória-helyek hozzárendelésének problémáival és utasításaival ismerteti meg az olvasót.

A számítástechnikával foglalkozó, a számítógépet közelebbről megérteni vagy azzal dolgozni szándékozó mérnökök figyelmét célszerű ráirányítani erre a — hazánkban még alig ismert — programozási nyelvre, és ennek érdekében *Volkmar Kussl* ügyesen megírt, jól használható könyvére.

Dr. Jándy Géza

B. P. Gyemidovics

MATEMATIKAI ANALÍZIS

FELADATGYŰJTEMÉNY

Tankönyvkiadó, Budapest, 1971

Ez az oroszból fordított magyar nyelvű könyv 590 oldal terjedelmű. Mintegy ötezer jól kiválasztott és jól érthető feladatot tartalmaz a matematikának a Differenciálszámítás, Integrálszámítás és Végtelen Sorok című fejezetei köréből. A könyvet elsősorban az egyetemek azon matematika szakos hallgatói és docensei használhatják, akik e három fejezet köréből kívánnak sokféle feladatot megoldani. Mérnök szakos egyetemi hallgatók, akiknek a matematika egyéb fejezeteivel (differenciálegyenletek, vektorszámítás, mátrixszámítás, numerikus analízis stb.) is foglalkozni kell, nehezen fognak időt találni ahhoz, hogy a három fejezet köréből ily sokféle feladatot megismerjenek. De a könyv átlapozása részükre is igen hasznos lesz, mert így megismerhetnek egy könnyen kezelhető könyvet, amelyben a később felmerülő szükségleteik során sokféle számítási képletet, fogalmi meghatározást, tantételt, konvergenciakritériumot találhatnak meg.

Dr. Barta József

L. Helm—J. Marton

EINFÜHRUNG IN DIE FLUIDIK

PNEUMATISCHE LOGISCHE ELEMENTE UND SYSTEME

Akadémiai Kiadó, Budapest 1971. 166 oldal, 130 ábra, 11 táblázat.

A szerzők a szabályozástechnika egyik újabb, gyors ütemben fejlődő ága, a pneumatikus szabályozó- és vezérlőrendszerek összefoglaló ismertetését tűzték ki célul. Mint az alcím is jelzi, elsősorban a pneumatikus logikai elemek és a hozzátartozó periféria berendezések felépítésének és működési elvének leírását adják, tájékoztatnak ezenkívül a pneumatikus szabályzókörök összeállításáról és az alapvető technológiai problémákról is.

A könyv tárgyalásmódja közérthető, az olvasótól csupán az elemi gépészeti és szabályozástechnikai ismereteket követeli meg: megértéséhez sem felsőfokú matematikai, sem áramlástani előképzettség nem szükséges.

A rövid bevezetésben a pneumatikus rendszerek előnyeiről, és kedvező alkalmazási területeiről tájékozódhatik az olvasó. Mindjárt kezdetben szembetűnik az áttekinthető rendszerezés és a világos, gazdag ábraanyag, a könyv egyik fő erőssége.

A fejlődés időbeli sorrendjét követve először a mozgó alkatrészekkel dolgozó membrán-, fólia-, golyós- stb. elemekkel ismerkedünk meg. Az elvi szerkezeti vázlatokat, működési leírásokat és kapcsolási ábrákat néhány jól megválasztott ipari elemcsalád ismertetése egészíti ki.

A mozgó alkatrész nélküli elemek osztályozása a működési elv alapján (sugarak egymásra hatása, levegősugár és fal közti hatás) történik. Az elvi leírást és diagramokat itt is ipari példák teszik teljessé.

A bináris kódban dolgozó alapelemekből összeállított pneumatikus szabályzókörökhöz ugyanilyen elven alapuló mérőadók, jelátalakítók és egyéb berendezések is szükségesek.

A helyzetjelzők tulajdonképpen egy adott helyzet elérésekor lépnek működésbe, de összetett változatban pl. folyamatos szöghelyzet regisztrálásra is felhasználhatók. Ismerteti a fejezet a sebesség-, folyadéknívó-, nyomás-, hőfok-, áramlási sebesség- és fényerősség adók működésmódját és felépítését is. Mint a felsorolásból is látszik, a pneumatikus szabályozórendszerek ezen a téren még nem nyújtanak az elektronikus rendszerekkel egyenértékű gazdag ipari választékot, de speciális alkalmazási területükön az igények nagyrészét már így is kielégítik és a gyors ütemű fejlesztés napról napra hoz újdonságokat.

A következő fejezet a gyakorlati szempontból igen fontos jelátalakítókkal foglalkozik. A gyakran alkalmazott kombinált pneumatikus-elektromos vagy elektromos-pneumatikus szabályzórendszerek is ilyen jelátalakítókkal készíthetők. Az egyes elemek különböző nyomásszintjét teljesítményerősítőkkel hidalhatjuk át és ugyanezek az elemek adják a szervóberendezésekhez szükséges teljesítményt is. Részletesen ismerteti a könyv az átkódolási lehetőségeket és a sokszor érdemtelenül mellőzött egyéb segédberendezéseket is.

Az első két részt néhány rövidebb, de hasonlóan jól sikerült fejezet egészíti ki. Rövid áttekintést kapunk a szabályzóelemek gyártásához felhasznált anyagféleségekről és technológiai eljárásokról. Néhány ipari példán megismerkedünk teljes pneumatikus szabályzókörök felépítésével és üzemi tulajdonságaival is. A könyv végén részletes irodalomjegyzék, a fontosabb cégek jegyzéke és betűrendes tárgymutató található.

Mint az előbbi — talán túlságosan is részletes — ismertetésből is kitűnik, HELM László és MARTON József munkája a szakirodalom és hazai ipari tapasztalatok alapján jó áttekintést ad a pneumatikus szabályzóelemek alkalmazási lehetőségeiről. Tartalmát és tárgyalásmódját tekintve a tárgykörrel ismerkedni szándékozónak tankönyvnek is, szerkesztési munkához áttekintő kézikönyvnek is egyaránt ajánlható. Mindkét esetben nagy segítséget nyújt és az olvasónak sok időt megtakarít a részletes irodalomjegyzék és tárgymutató.

Dr. Gedeon József

M. Makhult

SCHWINGUNGSTECHNISCHE BEMESSUNG VON MASCHINENLAGERUNGEN

Akadémiai Kiadó, Budapest 1970, 138 oldal + 10 nomogramlap, 98 ábra, 21 táblázat

A jó gépalapozás minden szükséges szempontot figyelembevevő megtervezése szerteágazó feladat. A szóban forgó könyv a gépalapozással foglalkozó szakemberek közül elsősorban a gépészmérnököt kívánja segíteni. Összefoglalja azokat az elméleti alapismereteket, gyakorlati

tapasztalatokat és főbb szokásokat, amelyeket bizonyos típusú gépalapozás tervezése során fel kell használni. Ezek az ismeretek a gépkonstrukcióra is visszahatnak például azon a csatornán át is, hogy érdemes lehet a gépet és alapozását a könyvbeli viszonylag egyszerű számítások alkalmazhatósága érdekében úgy megszerkeszteni, hogy alapozásának számításakor a szerző által bevezetett egyszerűsítő feltevések kielégüljenek.

A könyvben ismertetett számítások közvetlenül az alábbi két főesetre alkalmazhatók: 1. ha a gépet merevnek vehető, rugalmasan felfüggesztett alaptömbre alapozzuk, 2. ha a gépet tömegtelennek vehető rugalmas alátéttel, külön alaptömb nélkül függesztjük fel.

A számítások alapja mindig az állandó együtthatós, lineáris differenciálegyenletre vezető modell. A merev testként kezelt gépalaptömböt és rugózását is olyannak feltételezi a szerző, hogy annak számítása a közvetlen szemlélet alapján szétesik hat darab egyszabadságfokú modellnek a számítására.

Elméleti bevezetéseket a szerző általában nem ad, inkább fizikailag jól szemléltetett végeredményekkel s azok alkalmazási művészetével operál.

Az alapozás méretezéséhez szükséges nagyszámú gyakorlati tapasztalatot is jó rendszerezésben adja elő, s valamennyi főbb számítás segítésére többszínnyomású nomogramokat is mellékel. Ezek valamennyien ugyanazon minta szerint kezelhetők, a bennük szereplő valamennyi mennyiség gyakorlatilag fontos teljes értéktartománya szerepel, s a leolvasási pontosság mindenütt gyakorlatilag egyforma.

Jól szemlélteti az elmondottakat a mű alábbi tartalomjegyzéke:

I. Allgemeines über Maschinenlagerungen
II. Grundlagen der Schwingungslehre
III. Hilfsberechnungen
IV. Der Entwurf von Maschinenlagerungen
V. Nomogramme
  1. Die Federkonstanten des Bodens.
  2. Federkonstanten elastischer Materialschichten.
  3. Querfederkonstante der Stahlfeder. Trägheitsmomente und Halbmesser.
  4. Eigenschwingungszahl des Schwingungssystems mit einem Freiheitsgrad. Vergrösserungsfaktor.
  5. Beschleunigung der Schwingungsbewegung. Massenkraft. Amplitude der frei schwebenden Masse. Zentrifugalkraft.
  6. Kreisfrequenzen der Pendelschwingungen des Systems mit sechs Freiheitsgraden.
  7. Drehpunkte der Pendelschwingungen des Systems mit sechs Freiheitsgraden.
  8. Dämpfungsbeiwert. Amplituden des Systems mit Wegerregung.
  9. Amplituden des Hammerfundaments.
  10. Baugrundschwingungen im Umkreis um Hammerfundamente.
VI. Zahlenbeispiele
  1. Gründung eines Einzylinder-Kolbenkompressors.
  2. Gründung eines 1000-kp-Dampfhammers.
  3. Schwingungsentstörung an einem Instrumentenschrank.
  4. Auflagerung eines elektrischen Umformers auf Gummifedern.

A szerző a mű előszavában — többek között — azt a véleményét fejti ki, hogy a felsőbbfokú oktatásban szerzett elméleti ismeretek hatékonysága jelentősen fokozható a lengéstani összefüggéseknek a gyakorlat követelményeit kielégítő rendszerezésével és értékelésével. Jelen referens az ezzel a véleménnyel való egyetértését hangsúlyozva meg szeretné állapítani, hogy a hatékonyságot még tovább lehetne fokozni a felsőbbfokú oktatásban tanított anyaghoz való szervesebb kapcsolódással, a speciális összefüggések mellett az általánosak bemutatásával, s a speciálisoknak az előbbiekből való levezetési vázlatának szerepeltetésével. Különösen ebből a szempontból sajnálatos, hogy elég nagyszámú — az eredményeket, s a mű lényegét nem befolyásoló — főként finomságokkal kapcsolatos, olyan pontatlanabb megállapítás található a műben, amelyeket jelenlegi műegyetemi oktatásunkban igyekszünk elkerülni. Feltehető, hogy ezek nagy része a német fordítás során adódott elő.

Mindezt egybevetve: könyvével a szerző sokszor művészetnek is beillő magasfokú, gyakorlatias irányú szaktudással ad nagy segítséget az említett típusú gépalapozások tervezésében olyan esetekben, amikor nem gazdaságos számítógépi (esetleg optimalizáló) programok alkalmazása. Művével alapot ad az erre a célra szolgáló számítógépi programok esetleges elkészítéséhez is.

A könyv gépalapozással foglalkozók számára melegen ajánlható.

Dr. Bosznay Ádám

Pelikán József

STATIKA.

EGYETEMI TANKÖNYV

Tankönyvkiadó, Budapest, 1971, 228 oldal, 234 ábra

Ez a könyv a Budapesti Műszaki Egyetem Építészmérnöki Karának hallgatói részére készült. Anyagát a Szerző az építészmérnöki gyakorlat igényeinek megfelelően állította össze, messzemenően igyekezvén a Statikára épülő további tantárgyak számára közvetlenül felhasználható, biztos alapokat nyújtani.

A kiindulás három alapfogalomból történik: a mozgás, illetőleg elmozdulás, az erő és a munka. Ezek felhasználásával a tankönyv egy könnyen belátható munkatételt vesz alapul, ami lehetővé teszi, hogy a szokásos tárgyalásmód egyes axiómái már csak levezethető tételekként nyerjenek megemlítést.

Ezután az anyagi pontra, majd a merev testre ható síkbeli erőrendszerek ismertetése következik. Itt a szerző bevezeti és a továbbiakban kiépíti a dinám fogalmát. Eredő-meghatározási és egyensúlyozási feladatokon kívül kötelek egyensúlyi alakjával is foglalkozik, majd a statikailag határozott síkbeli tartószerkezetek tárgyalására tér át. A leggyakrabban előforduló tartótípusokon kívül itt ismerteti meg a megoszló erőrendszereket.

A következő fejezet a különböző tartók belső erőiről és azok meghatározásmódjáról szól. Sorra kerülnek többek közt a keresztmetszetekre ható igénybevételek, az igénybevételi függvények, majd az egységfüggvények.

Az ezt követő fejezet a mozgó, majd egy további fejezet a változó terhekkel foglalkozik, végül a mértékadó igénybevétel számítás következik.

Újabb terjedelmes fejezet tárgyalja a térbeli erőrendszereket. Ennek keretébe vannak illesztve a derékszögű kötélhálók, a súlypont fogalma és meghatározásmódjai, síkidomok másodrendű nyomatékai. Ezután a könyv a tanultakat statikailag határozott térbeli tartószerkezetek külső reakcióinak és belső erőinek meghatározására használja fel.

A Függelék egyik érdekes fejezetében a szerző a kutatás — feladatmegoldás — módszeréről ad az olvasónak hasznos tanácsokat.

A tankönyv legnagyobb érdekessége a tárgyalás módja. Fejezetenként *I* jel alatt azok az elméleti tudnivalók vannak összefoglalva, amelyeknek biztos ismerete a továbbhaladáshoz, a továbbiak megértéséhez nélkülözhetetlenül szükséges. A *II* jel alatt összefoglalt részekben a mennyiségi összefüggések feltárására kerül sor, itt következnek tehát a számpéldák, konkrét megoldások stb. Végül * alatt olyan igényesebb anyagrészek következnek, amelyek a kötelező ismeretanyagon felül a továbbhaladást, például a Tudományos Diákkörök munkáját kívánják előmozdítani és az érdeklődést felkelteni.

Igen örvendetes meglepetés a könyvben az elektronikus számítógépek használatának bevezetése. Ennek megkönnyítésére a Függelék utolsó fejezete mintegy 16 oldal terjedelemben könnyen tanulható módon vezeti be az olvasót a programozásba az ALGOL 60 programozási nyelv egyszerű változatán. Az egyes fejezetek példái között pedig a síkbeli erőrendszer eredőjének meghatározásától kezdve úgyszólván mindenütt találunk ilyen megoldást, illetőleg részletes ALGOL programot. Mindez azt mutatja, hogy a szerző nemcsak átérzője volt a modern idők követelményeinek, hanem egyben kitűnő pedagógus is, aki jól értett a hallgatóság érdeklődésének felkeltéséhez.

Behajtva a könyv utolsó lapját, lehetetlen meghatódottság nélkül nézni a tiszta fekete kötéstáblát, a gyásznak ezt a komor színét. A szerző már nem érhette meg könyvének megjelenését, két évvel ezelőtt kihullott kezéből a toll. És amint újra olvassuk egy-egy jól megfogalmazott mondatát, szemléljük a világos ábrákat, mindig élesebben, mindig fájóbban érezzük azt a súlyos veszteséget, ami dr. PELIKÁN József professzor halálával felsőoktatásunkat, a magyar építész- és építőmérnökök kollektíváját, tisztelőinek és barátainak széles körét érte.

Dr. Cholnoky Tibor

PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PHYSICS AND CHEMISTRY OF SEMICONDUCTOR HETEROJUNCTIONS AND LAYER STRUCTURES.

Akadémiai Kiadó, Budapest 1971. 5. kötet, 1780 old.

1970. október 11—17 között került lebonyolításra Budapesten a Félvezető Heteroátmenetek és Rétegszerkezetek Fizikájával és Kémiájával foglalkozó Nemzetközi Konferencia, a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Tudományok Osztályának, az Eötvös Lóránd Fizikai Társulatnak és a Híradástechnikai Tudományos Egyesületnek rendezésében.

Amint arra megnyitó előadásában SZIGETI György akadémikus, a Szervező Bizottság elnöke utalt, a tágabb értelemben vett heteroátmenetek jelentősége — amint az például a vonatkozó nemzetközi szintű publikációk számának növekedéséből is kitűnik — egyre fokozódik.

Az elhangzott előadások a fém-félvezető, szigetelő-félvezető közötti és az egymástól eltérő anyagú félvezetők közötti átmenetek jellegzetes fizikai és kémiai jelenségeivel foglalkoztak. Az említettek közül különösen hasznosak azok az ismeretek, amelyek a két félvezető tulajdonságú anyag közötti átmenetekre vonatkozó kutatás során születnek. Az idevágó eredményeket közlő előadások, a konferencia egyik legnagyobb érdeklődéssel kísért témakörét képezték.

A beküldött előadások öt szekcióba sorolva kerültek bemutatásra;

1. A heteroátmenetek előállítása és azok struktúrája;
2. A heteroátmenetek optikai és elektromos tulajdonságai;
3. A vékonyréteg félvezetők előállítása és azok struktúrája;
4. A vékonyréteg félvezetők elektromos és optikai tulajdonságai;
5. A MOS és MIS struktúrák előállítása és azok tulajdonságai.

A konferencia anyagát tartalmazó kiadvány — a szekcióbontásnak megfelelően — öt kötetre tagolódik. Az elhangzott előadások többsége a heteroátmenetek előállításával. felépítésével. valamint azok optikai és elektromos tulajdonságaival foglalkozik. Különösen érdekesek azok az előadásanyagok, amelyek az előállítási technológiákkal kapcsolatos eredményeket ismertetik.

Megnyitójában SZIGETI akadémikus a benyújtott előadási témák megoszlását ismertette. A vizsgált anyagok összetételére vonatkoztatva megállapította, hogy az előadások többsége az $A^{III}B^{V}$ vagy $A^{II}Bp^{VI}$ binér vegyületekkel foglalkozik. Emellett jelentős számban szerepeltek olyan előadások is, amelyek a hagyományos félvezetőanyagok — germánium és szilicium — közötti heteroátmenetek struktúráját, optikai és elektromos tulajdonságait vizsgálják.

Néhány szerző a viszonylag bonyolult, többkomponensű vegyületekkel foglalkozott. Mind elméleti, mind pedig gyakorlati szempontból igen fontosak azok a megállapítások, amelyek a fémek és félvezetők közötti, valamint a félvezetők és a különböző szigetelők közötti átmenetekre vonatkozóan elhangzottak.

Ugyancsak nagy érdeklődésre tarthatnak számot azok az előadások, amelyek a vékony rétegek szerkezetével és tulajdonságaival, valamint a MOS és MIS struktúrákkal foglalkoznak.

Az egyes előadások szövegét követően az ötkötetes kiadvány tartalmazza a diszkussziók során elhangzott fontosabb észrevételeket és az azokra adott válaszokat is.

A kiadvány ötödik kötetében, külön csoportosítva szerepelnek azok az előadások, amelyek témájukat tekintve az előzőekben ismertetett öt szekció egyikébe sem voltak besorolhatók.

Egészében véve a konferencia anyaga igen jól tükrözi a heteroátmenetek és rétegszerkezetek fizikája és kémiája terén elért legújabb eredményeket, s egyben — a felkért előadók előadásain keresztül — bizonyos visszatekintést, elemző összegezést és perspektivikus iránykijelölést is ad, ebben a napjainkban igen fontos témakörben.

Dr Bitó János

Szabó, G.

DIE GRUNDLAGEN EINER NEUEN FESTIGKEITSTHEORIE, Bd. 1.

2. javított kiadás; Bauverlag, Wiesbaden—Berlin 1970; 114 oldal, 83 ábra 11 táblázat

A szilárdság elméletének új alapjait a szerző három részben kívánja közreadni. A második kiadásban megjelent első kötet az elmélet első részét tartalmazza, a másik két rész a később megjelenő második kötetben kerül közlésre.

Az elmélet első része bemutatja, ill. levezeti az egyes szilárdságfogalmak (húzás, nyomás. nyírás, hajlítóhúzás, hasítóhúzás) elméleti alapjait és összeveti az új elmélettel spekulatív alapon nyerhető értékeket számtalan anyagvizsgálati laboratórium által közölt mérési eredménnyel.

A szerző logikus gondolatmenettel, sokoldalúan bizonyítja új szilárdságelméletének — az elméleti fizikával nem ellentmondó — alapgondolatát: az anyag részecskéi között vonzás következtében a részecskék között nyomás lép fel (a felfekvési pontokban). A test húzóigénybevétele során a részecskék közötti nyomás csökken. A részecskék közötti nyomóerő megszüntekor lép fel az anyagban a szakadás. A belső sajátfeszültség állapot az anyag egyetlen szilárdsági jellemzője. A sajátfeszültségek elméleti alapjából következik, hogy a test keresztmetszetében megoszlásuk nem egyenletes. A mérnöki mechanika szilárdságtani jellemzői tehát nem egyszerű anyagállandók: értékük a test méretének és alakjának függvénye.

A könyvet élvezetes olvasmánnyá nemcsak érdekes mondanivalója teszi. hanem jó stílusa és az összefüggések mértéktartó, józan fogalmazása is. Minimális matematikai fegyverzettel is tud a szerző sok országban elvégzett kísérletek adatait felhasználó számszerű összehasonlításokat adni.

Dr. Szabó János

K. Géher

THEORY OR NETWORK TOLERANCES

Akadémiai Kiadó, (Publishing House of the Hungarian Academy of Sciences) Budapest 1971, 184 oldal, 121 ábra.

Világszerte egyre többen foglalkoznak elektronikus áramkörök tervezésével. így nem véletlen, hogy a hálózatelmélet, amely hatékonyan segíti a tervezési feladatok megoldását. az érdeklődés középpontjában áll. A hálózatelmélet — főleg ennek a lineáris hálózatokkal foglalkozó része — azáltal van kitüntetve, hogy a tárgykörébe eső jelenségek értelmezése egzakt matematikai módszerekkel elvégezhető.

A szigorúbb specifikációknak eleget tevő, valamint nagyobb sorozatban gyártott áramkörök — például a szilárdtest integrált áramkörök — esetében alapvetően fontos szerepet kap a toleranciaszámítás.

A szerző célja — a sürgető igényeket felismerve — áttekintést nyújtani az érzékenységi módszerekről, és egyben felhívni a figyelmet azok célszerű, hálózatelméleti alkalmazására. A monográfia egyben rámutat azokra a lehetőségekre is, amelyek felismerésével az elmélet további finomításának útjai mintegy kijelölhetők.

A toleranciaszámítás a modern hálózatelmélet nélkülözhetetlen módszere. Felhasználásával minimálisra lehet csökkenteni azokat a tényezőket, amelyek a számított és mért hálózati paraméterek közötti eltérésekért felelősek.

A könyv jól áttekinthető, felépítése didaktikailag kifogástalan, a szerző komoly egyetemi oktatási tevékenységét tükrözi. A tárgyalásmód mindazok számára könnyen követhető, akik a hálózatelmélettel és a felsőbb matematikával egyetemi szinten megismerkedtek.

A nyolc fejezetre tagolódó monográfia a 123 tételes irodalomjegyzék mellett tárgymutatót is tartalmaz.

Az első fejezet a toleranciaszámítási módszerek rövid, bevezető jellemzése után ismerteti azok kialakulását, és mintegy feltárja az Olvasó számára a téma érdekességeit, egyben előre jelzi és indokolja a könyv felépítését.

A hálózatok paramétereinek tartományába vezet el a második fejezet, amely többek között a hálózatfüggvény elemzését, a lineáris, bilineáris, bikvadratikus teorémákat, valamint a hálózatelemzésnél és tervezésnél számításba jövő fontosabb közelítő módszereket tartalmazza, utalva azok alkalmazhatóságának kritériumaira.

A harmadik fejezet az érzékenységekkel foglalkozik. Az érzékenység, relatív érzékenység, valamint a semi-relatív érzékenység definíciója után a szerző bebizonyítja, hogy szoros kapcsolat áll fenn a különböző köri paraméterekből számított érzékenységek között. Ezek az összefüggések azonban az érzékenységi invariánsokkal kifejezhetők, vagy akár indirekt úton is meghatározhatók. Ez utóbbira több módszert ismerhet meg az olvasó, e fejezet keretében részletezett, jól áttekinthető megfontolások követésével.

A tolenrancia-analízist és -szintézist a negyedik fejezet tartalmazza. Adott esetben az optimalizáció a minimális költségek szem előtt tartásával történik, a részletesen ismertetett megfontolások alapján.

A passzív és az aktív lineáris hálózatokkal kapcsolatos összegezést az ötödik és a hatodik fejezet tartalmazza. A hetedik fejezet a logikai körök statikus és dinamikus toleranciájával foglalkozik.

Örömmel kell üdvözölnünk a szerző rendkívül alapos munkáját, amely egyben e tudományterület első monográfia jellegű áttekintése. A szerző egyik korábbi könyvében — Lineáris hálózatok. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1968 — már felvetette az áramkörök toleranciaszámításának fontosságát, valamint az időben változó paraméterű hálózatok elemzésének szükségességét. Az igények helyes és gyors felismerése mind a szerzőt, mind pedig az Akadémiai Kiadót dícséri. A monográfia mind témájánál, mind tartalmánál fogva széles körű nemzetközi érdeklődésre tarthat számot. Ezt figyelembe véve angol nyelvű megjelentetése indokolt.

Dr. Bitó János

Szabó János—Roller Béla

RÚDSZERKEZETEK ELMÉLETE ÉS SZÁMÍTÁSA

Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1971, 268 oldal, 85 ábra.

A gyakorlat igényeitől, az elmélet szépségétől és a programvezérelt számítógépek adta lehetőségektől indíttatva számos mű jelent és jelenik meg a szerkezetek elméletének mátrixos módszereiről. Ez a könyv — címéből is kitűnően — a rúdszerkezetek ilyen elemzését tűzi ki céljául. A mű konkrét fejtegetései a legegyszerűbben modellezett, Hooke törvény szerint viselkedő anyagú, prizmatikus rúdakból felépített szerkezetre vonatkoznak, de ily módon a görbe, illetve változó keresztmetszetű rudakból álló szerkezet viselkedését is approximálni lehet. A könyv általános jellegű megállapításai kiterjeszthetők a tetszőleges rugalmas elemekből álló szerkezetre, azaz a véges elemek módszere egy elméletének is tekinthetők.

A könyv négy fejezete közül az első könnyen érthető formában összefoglalja a mátrixalgebrának a továbbiakban felhasznált tételeit és egyes numerikus módszereit. A következő fejezet az elméletet kis elmozdulások esetére fejti ki, beleértve a csillapított és csillapítatlan rezgések egy elméletét. A másod- és harmadrendű elméletnek az addig felépítettekre alapozott elemzése, s statikai esetre érvényes, az alkalmazását lehetővé tevő numerikus eljárás bemutatása a harmadik fejezet tárgya. Az utolsó fejezet rúdszerkezetek valamely állapotának stabilitáselvesztését (pontosabban az elágazási problémát) vizsgálja annak a stabilitásdefiníciónak az alapján, amely szerint az egyensúlyi állapot akkor stabilis, ha a terheket változatlanul hagyva egyetlen olyan „szomszédos" állapot sem létezik a vizsgált állapot közelében az elmozdulásokat és velük kompatibilisen a belső erőket variálva, amelyben a szerkezet ugyancsak egyensúlyban lehetne.

A fent vázolt anyagot a szerzők egységes képbe foglalják össze azáltal, hogy felállítják a rúdrendszer állapotváltozásának mátrix-differenciálegyenletrendszerét. Ez az egyenletrendszer magában foglalja a rúdrendszerrel kapcsolatos valamennyi mechanikai (statikai, szilárdsági, kinematikai) és geometriai jellegű törvényszerűséget.

Minden, a könyvben kifejtett további általánosabb, vagy részletvizsgálat a fent mondott differenciálegyenletrendszer (ami egyszerűbb esetben algebraivá fajul) valamely alesetéként kerül bemutatásra. Az irodalomban másutt is jelennek meg ilyen egységesítő törekvések; a jelen mű ezek közül érvényességi tartományának szélességével, és azzal tűnik ki, hogy olyan módon szintetizál, hogy a fizikailag különbözőnek tekintett forrásokból származó törvényszerűségeket nem olvasztja szétválaszthatatlanul össze. Ez utóbbi teszi lehetővé, hogy a legkülönbözőbb ismert rúdszerkezet-elemző eljárásokról szinte azonnal ki lehet mutatni, hogy valamennyien benne foglaltatnak a szerzők általános állapotváltozási egyenletrendszerében.

Az általános módszer konkrét esetekre való alkalmazása során természetes módon evidenciába kerül a szerkezet statikai, illetve kinemetikai határozottsága, határozatlansága

vagy túlhatározottsága. A jól ismert munkatételek is könnyen levezethetők az általános elméletből. Nagyon jól szemlélteti a 44. ábra öt blokkdiagramja az általános mátrixegyenlet mátrixainak azokat a particionálásait, amelyeket statikailag határozott szerkezet megoldásakor, vagy statikailag határozatlan szerkezetnek az elmozdulásmódszerrel, az általánosított elmozdulásmódszerrel, az erő-módszerrel, vagy a határozatlan törzstartó módszerével való tárgyalásakor kell alkalmazni.

Több különleges, és gyakorlatilag jelentős szerkezettípusra részletesen is konkretizálja a könyv az általános módszert; ezek: síkbeli fix és kilengő csomópontú keretszerkezetek, a rugalmas alátámasztású tartók egyes fajtái, tartórácsok, síkbeli rúdláncok, kifüggesztett rúdhálók, derékszögű kötélhálók.

A könyv kiállítása, elrendezése, ábrái, nyomása színvonalasak. Stílusa általában jól érthető; a bevezetéssel foglalkozó 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 pontok fogalmazása azonban egyes helyeken egyenetlen, s nem eléggé pontos; a rezgésvizsgálatot tárgyaló 2.7 pont meggondolásait pedig egy következetesen végigvonuló előjelhiba zavarja. Kár, hogy a különleges szerkezettípusok, s egyes példák elemzésekor a szöveg helyenkint eléggé nagy lépésekben halad, holott a gyakorlati szakemberek valószínűleg nagyobb részletezést igényelnének.

A munka megjelenését mind az elmélet szépsége, mind gyakorlati hasznossága és érdekessége miatt örömmel üdvözölhetjük. Igényes szerkezettervező és elméleti szakember könyvei közül nem szabad, hogy e mű hiányozzék.

A fent kifejtettek következtében nagy a valószínűsége, hogy külföldi érdeklődésre is lehet számítani, ami idegen nyelvű kiadást is szükségessé fog tenni. Ez esetben, illetve 2. magyar kiadás előkészítésekor célszerű volna a fent említett kisebb hiányosságok korrigálása, továbbá a stabilitásvizsgálat kiszélesítése más stabilitásdefiníció(k) alapulvételével is.

Dr. Bosznay Ádám

ÉPÍTŐMÉRNÖKI SZAKIRODALOMKUTATÁS

Tankönyvkiadó, Budapest 1971, kb. 400 oldal.

Ez a mű a szakirodalomkutatás segédkönyveinek 6. kötete, amely a rendkívül szerteágazó építőmérnöki szakterület irodalmához kíván segítséget nyújtani. Szerkesztője Dr. HÉBERGER Károly, összeállításán 16 szerző munkálkodott.

A könyv első harmada a szakirodalomkutatáshoz szükséges általános ismereteket tárgyalja. Ennek keretében ismerteti a könyvtári katalógusok különböző típusait, a dokumentációs kiadványok különböző fajtáit, majd a különleges dokumentum-típusokat, így a szabadalmi leírásokat, a szabványokat, a vállalati irodalom termékeit, a kutatási jelentéseket stb. Ismerteti a könyvtári tájékoztató munka és az irodalomkutatás hagyományos módszereit, és bepillantást ad a korszerű gépesítési törekvésekbe és eredményekbe. Részletezi a könyvtárak igénybevételéhez szükséges ismereteket, kitérve az építőmérnöki irodalomkutatás szempontjából legfontosabb hazai könyvtárak irodalomkutatási szempontjából lényeges adataira.

Az általános ismeretekkel foglalkozó részt követően — a teljes volumennek mintegy 2/3-ában — 13 fejezet keretében megadja az építőmérnöki szempontból legfontosabb tudományágak és szakterületek válogatott bibliográfiáját. A bibliográfiák külön alfejezetekben adják meg a tankönyvek, a kézikönyvek és szakkönyvek, valamint a szakfolyóiratok megfelelő adatait. A kötet a következő tudományágak, illetve szakterületek bibliográfiáját tartalmazza: matematika, fizika, mechanika, építőanyagok, talajmechanika és műszaki geológia, beton- és vasbetonszerkezetek, acélszerkezetek és hídépítés, faszerkezetek, közlekedésépítés és közlekedésfejlesztés, hidromechanika és vízépítés, épületszerkezetek, építőipari gépek, építésszervezés, építéstechnológia, építőipari gazdaságtan.

A kötet használatát részletes tárgymutató segíti.

A felfogásában és részleteiben egyaránt színvonalas munka jelentősen hozzájárulhat az építőmérnöki kutató, tervező és kivitelező gyakorlat szempontjából egyre nagyobb fontosságú irodalomkutatás hazai fejlődéséhez.

Dr. Kunszt György

KÖZLEMÉNYEK

AZ ÉPÍTŐIPARI MÉRNÖKI NEMZETKÖZI SZERVEZETEK ÖSSZEKÖTŐ BIZOTTSÁGÁRÓL

Az építőipar területén több nemzetközi mérnöki szervezet tevékenykedik melyek munkájának összehangolása céljából a legfontosabb hét egyesület évekkel ezelőtt az elnökökből álló összekötő bizottságot (Liaison Committee) hozott létre. Ezek az egyesületek a következők: a Nemzetközi Híd- és Magasépítési Egyesület (AIPC), az Európai Beton Bizottság (CEB), a Fémszerkezeti Egyesülések Európai Társasága (CECM), a Nemzetközi Előfeszítési Szövetség (FIP), a Nemzetközi Építéskutatási Tanács (CIB), a Nemzetközi Héjegyesület (IASS), Építőanyagok és Szerkezetek Anyagvizsgáló Laboratóriumainak Nemzetközi Egyesülése (RILEM). „Levelező" tagok a CEMBUREAU és az Előregyártott Beton Nemzetközi Irodája (BIBM). Az Összekötő Bizottság utolsó ülését 1971 december 11-én Lausanne-ban tartotta és ezen az 1972—1973 évekre elnökké a CIB jelenlegi magyar elnökét, SEBESTYÉN Gyulát választotta. Az ülésen egyeztették az egyesületeknek a következő évekre tervezett rendezvényeinek a tervét és megtárgyalták néhány, a korszerű építőipari tervezés szempontjából kiemelt fontosságú problémának helyzetét és tervét. Ezek a problémák többek között az alábbiak: a szerkezetek biztonsága, a magas épületek méretezése, az acélból és betonból készített vegyes („öszvér") szerkezetek, a vékony betonhéjak tervezése és építése, a betonszerkezetek tartóssága és korróziója, a szerkezetek tűzzel szembeni biztonsága.

A biztonsággal kapcsolatos elvek további tisztázást igényelnek. Meg kell állapodni a méretezésnél figyelembe veendő terhekben, a meteorológiai hatásokra, a rendkívüli véletlen hatásokra (földrengés, robbanás, becsapódás, hangrobbanás, szökőár) és az ismétlődő hatásokra való méretezésben. Az anyagtulajdonságokat (beton, acél) tovább kell feltárni.

Nagyszabású munka folyik a magasépületek tekintetében. 1971 októberében Moszkvában tartottak erről sikeres nemzetközi szimpoziumot és 1972 augusztusában az Egyesült Államokban a Lehigh egyetemen folytatódik a 25 munkabizottságban közben feldolgozott eredmények megvitatása.

A többi témának koordinált erőfeszítéssel való előreviteléhez is a különböző szervezetek sok országbeli szakembere fogott össze és több szimpozium terve került elfogadásra a közbenső eredmények megvitatása céljából.

A *nemzetközi építőipari mérnöki tudományos szervezetek rendezvény naptára* az Összekötő Bizottság iratai szerint az 1971 novemberi állapot alapján az alábbi:

Rövidítések: AIPC = Nemzetközi Híd- és Magasépítési Egyesülés
CEB = Európai Beton Bizottság
CECM = Fémszerkezeti Szervezetek Európai Szövetsége
FIP = Nemzetközi Előfeszítési Egyesülés
CIB = Nemzetközi Építéskutatási Tanács
IASS = Nemzetközi Héjegyesület
RILEM = Anyagvizsgáló és Kísérleti Laboratóriumok Nemzetközi Egyesülése

1972 január
18—20, Prága, CIB, W55 Építésgazdaság
20—21, London, FIP, Előfeszítő acélok
25—26, Luxemburg, RILEM, Végrehajtó Bizottság
....., Párizs, CIB, Építési tezaurusz latin nyelvcsoport

1972 február
14—16, Madras, FIP részvételével szimpozium: Nukleáris tartályok. csövek....
16—18, München, CIB W24/IMG Nemzetközi Modulcsoport

1972 március
3—4, Madrid, IASS, Végrehajtó Bizottság
7—8, Budapest, CIB, TS64 Közmű, előkészítőbizottság
9—10, London, CEB, Terhek
13—15, Osló, CIB, Program és Adminisztratív Bizottság
21—22, Csikágó, CECM, Pillérek
23—24, London, FIP, Könnyű betonok

1972 április
6—7, Amszterdam, FIP, PIF-napok
10—11, Párizs, FIP, Megvalósítás
21, Brunswick, FIP, Tűzvédelem
21, Madrid, CECM
24—30, Washington, RILEM. Állandó Bizottság
25—26, (vagy június 5—6) CIB, W52 Információcsere

1972 május
2—5, Philadelphia, RILEM-CIB, „Performance"-koncepció kollokvium
7—13, Amszterdam, AIPC, Állandó és munkabizottságok; 9. kongresszus
15, Graz, CECM . . ?
15—19, Stockholm, CIB, W14, Tűz
18—27, Leningrád, CEB, szabályzati bizottságok és 15. Teljes ülés
25—25, Bukarest, RILEM, Beton
május vagy június, CIB W60, „Performance"

1972 június
7—10, Várna, RILEM, Műgyanták
14—16, Udine, RILEM, Műszaki Bizottság
20—22, Koppenhága, RILEM, Habarcsok és vakolatok
20—21, Malmö, RILEM, Beton időállósága
.....,Delft, CIB W29, Beton felületképzése

1972 július
3—6, Calgary (Kanada), IASS, Éghajlati hatások héjakra, szimpozium
7, London, CIB, S47, Információáramlás
....., CIB/CEB/FIP/RILEM, Betonminőség, ellenőrzése
....., Berlin (NDK), CIB, Elnökségi ülés
10—15, Toronto, CECM, Hegesztési csoport. Közgyűlés

1972 augusztus
21—26, AIPC, Magasépületek

1972 szeptember
5—7, Stockholm, CIB, S4, Meteorológiai szimpozium
11—16, Bukarest, RILEM, Előregyártó elemekhez nagyszilárdságú betonok
13—15, Garston, CIB, W45, Hő-komfort
18—20, Holzkirchen, CIB W40, Hő- és nedvesség-vándorlás
18—20, Isztambul, RILEM, Könnyű betonok
20—22, Delft, IASS, Pneumatikus szerkezetek
25—29, Southampton, IASS, Variációs módszerek
25—30, Tbiliszi, FIP, Antiszeizmikus beton épületek szimpozium; Úszó és vízi szerkezetek betonból, szimpozium

1972 október	2—4,	Budapest, CIB, Program- és Adminisztratív Bizottság
	4—6,	Cannes, RILEM, Többtengelyű erőhatások
	.....,	London, FIP, Gépalapok
	.....,	Budapest, W19 Nagypanelek; Térelemek szimpozium
1972 november	18,	Párizs, a 7 szervezet Összekötő Bizottság ülése
	22—13,	Toulouse, RILEM, Kötőanyagok kötése anyagokhoz, kollokvium
1973 február	.....,	Roorkee (India), CIB, Elnökségi ülés
1973 április	16—19,	Leeds, RILEM, Beton bedolgozhatósága
1973 május	22—25,	Bratislava, RILEM, Roncsolásmentes vizsgálatok bizottság
	29—31,	Strbske Pleso, RILEM, Roncsolásmentes vizsgálatok, kollokvium
1973 június	13—15,	Bern, CEMBUREAU, Betonutak
	18—23,	Kielce (Lengyelország), IASS
1973 július	.....,	Párizs, CEB/FIP, Fejlődő országok
1973 szeptember	10—15,	Lisszabon, AIPC, Állandó Bizottság, munkabizottságok, Ismételt terhek, Szilárdság és maximális alakváltozás
	.....,	RILEM, Pórus-szerkezetek kollokvium
	.....,	Haifa, IASS, Vékony héjak előregyártása
1973 október	11—19,	London, CEB, Szabályzati bizottságok
	16,	Plenáris ülés
1973 november	.....,	Budapest, a 7 szervezet Összekötő Bizottság ülése
1974 május 26—június 1.		New York, FIP, 7. kongresszus
1974 szeptember	.....,	Kanada, AIPC, Állandó Bizottság, szimpozium
1974 október	2—10,	Budapest, CIB, 6. kongresszus
	10—18,	Lisszabon, CEB, Szabályzati bizottságok és 17. Plenáris ülés

A rendezvény-naptár természetesen állandóan változik.

A Liaison Committee élére magyar elnök megválasztása megbecsülést fejez ki a magyar építőipar szakemberei irányában. Az ezen bizottságban való részvételen keresztül a legkorszerűbb nemzetközi eredményekhez gyorsabban juthatunk hozzá és a nemzetközi tudományos életben is tervszerűbben vehetünk részt. A nemzetközi kapcsolatok az építőipar fejlődésének a meggyorsítását segítik elő.

Dr. Sebestyén Gyula

A NEMZETKÖZI HIDRAULIKAI KUTATÁSI SZÖVETSÉG XIV. KONGRESSZUSA

A Nemzetközi Hidraulikai Kutatási Szövetség (IAHR) XIV. kongresszusát 1971. VIII. IX. 3. között Párizsban tartotta. A kongresszus napirendjén a következő ülési témák szerepeltek:

A) Átadási problémák folyadéki áramlásban.
B) Hidrodinamikus erők nem-permanens állapotban.
C) Nem egyenletes anyagú alluviális medrek változásai.
D) A hordalék torkolatokban és deltákban.

A műszaki ülések mellett öt tárgykörben szemináriumi ülések voltak:

1. Hordalék lerakódás tározókban és ennek megelőzése.
2. Kavitáció a vízépítési műtárgyakban.
3. Árhullám levonulása árterületen.
4. Vízgazdálkodás-fejlesztés vízgyüjtő területeken figyelemmel a gazdasági szempontokra.
5. Beszivárgás nem telített talajokban.

A műszaki ülési témákhoz beküldött dolgozatokat összefoglaló beszámolók ismertették, a szemináriumi tárgykörhöz küldött dolgozatokat a szerzők személyesen mutatták be. A kongresszusra három magyar dolgozatot küldtek ki, kettőt a szivárgás (KOVÁCS György, BÖCKER Tivadar) és egyet az árvíz-levonulás (STAROSOLSZKY Ödön) tárgykörében. A kongresszus különböző vitáiban hat magyar hozzászólás hangzott el. A kongresszuson különböző szervek képviseletében és támogatásával BOGÁRDI János, DECSI Sándorné, GYÖRKE Olivér, HANKÓ Zoltán, HASZPRA Ottó, KOVÁCS György és STAROSOLSZKY Ödön, a kongresszust követő tanulmányúton pedig HANKÓ Zoltán vett részt.

A hidraulika tanulmányágának fejlődését tekintve megállapítható a kongresszus tükrében, hogy a nem permanens vízmozgásokhoz kapcsolódó jelenségek, a lebegő és az oldott anyagok elkeveredését leíró turbulens diszperzióra vonatkozó, valamint számítógépek alkalmazásához kapcsolódó módszertani vizsgálatok folynak nagy súllyal.

A kongresszuson kereken 600 résztvevő jelent meg. Különösen nagy létszámú volt a francia delegáció mellett a 45 fős szovjet delegáció. A Delft-i Nemzetközi Hidraulikai Továbbképző Tanfolyam hallgatóinak jó részét is delegálták.

A kongresszus időtartama alatt több párizsi hidraulikai laboratóriumban lehetett látogatást tenni. Ezek a laboratóriumok elsősorban felszereltség és műszerezettség tekintetében járnak a magyar hidraulikai kutatás előtt.

A vezetőség választása során az IAHR új elnökévé HAYASHI japán egyetemi tanárt választották meg. A magyar hidraulikai kutatás jelentős nemzetközi elismerésének számít, hogy BOGÁRDI Jánost beválasztották a 7 tagú vezetőségbe. Korábbi tárgyalások alapján megfelelő hivatalos meghívás esetén a folyami hidraulikai és a jég-hidraulikai bizottság 1974-ben Budapesten kíván közös szimpoziumot rendezni. A következő kongresszusra 1973-ban Isztambulban „A hidraulikai kutatás és a mérnöki gyakorlat, különös tekintettel az emberi környezetre" mottóval kerül sor.

A Magyar Tudományos Akadémia és az Országos Vízügyi Hivatal védnöksége alatt nemrég megalakult IAHR Magyar Nemzeti Bizottság (elnök KOZÁK Miklós) fontos feladata, hogy a jövőben nemzetközi kötelezettségeinknek eleget téve, az egyesületbeli tevékenységet nagyobb arányú magyar részvétellel élénkítse. Így felmerül a kereken 2500 egyéni tagot képviselő egyesületben a magyar kutatók egyéni tagságának szükségessége.

Dr. Starosolszky Ödön

A TUDOMÁNYOS MINŐSÍTŐ BIZOTTSÁG HÍREI

A Műszaki Tudomány 1970. évi 43. számában közöltük a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Tudományok Osztálya területén működő tudományos fokozattal rendelkezők névsorát.

Most közzétesszük az azóta bekövetkezett változásokat.*

Elhunytak

WINTER ERNŐ akadémikus
KNAPP OSZKÁR a műszaki tud. doktora
URBANEK JÁNOS a műszaki tud. doktora
BALOGH BÉLA a műszaki tud. kandidátusa
KOLOZSVÁRY GÁBOR a műszaki tud. kandidátusa
KONCZ ISTVÁN a műszaki tud kandidátusa
NAGY ÁLMOS a műszaki tud. kandidátusa
RÓZSA MIHÁLY a műszaki tud. kandidátusa
VÁGÓ ARTHUR a műszaki tud. kandidátusa

Új minősítettek

A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK DOKTORAI

BITÓ JÁNOS (1936, 1971) EIVRT
híradásipari technológia
elektronfizika

FARAGÓ KÁLMÁN (1923, 1970) BME Építőmérnöki Kar Városépítési Tsz.
településtudomány
városépítés

GAJÁRI JÓZSEF (1906, 1971) Közlekedési és Távközlési Műsz. Főisk.
közlekedési üzem

GERLE GYÖRGY (1909, 1971) VATERV
építésszervezés
építésgazdaságtan
településtudomány
városépítés

HUSZÁR ISTVÁN (1923, 1971) AE
műszaki mechanika

MICHELBERGER PÁL (1930, 1970) BME Közl. Kar Mechanikai Tsz.
műszaki mechanika
közlekedési gépek

RÉTHÁTI LÁSZLÓ (1924, 1971) Földmérő és Talajvizsgálat.
mélyépítés
hidromechanika, műszaki hidrológia

VÁGÓ ISTVÁN (1924, 1970) BME Villamosmérnöki Kar Elméleti Villamosságtan Tsz.
elméleti villamosságtan

VÖRÖS IMRE (1903, 1971) BME Gépészmérnöki Kar Gépelemek Tsz.
gépelemek, szerszámgépek

* A jegyzék az 1971 nov. 30-i helyzetet tünteti fel.

A KÖZLEKEDÉSTUDOMÁNYOK DOKTORA

FEKETE GYÖRGY (1910, 1971) MAHART
folyami és tengerhajózás, műszaki és gazdasági kérdései

A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSAI

BÁRSONY ANDRÁS (1935, 1971) BME Villamosmérnöki Kar Folyamatszabályozási Tsz.
ipari folyamatok automatizálása

CSUTOR JÁNOS (1924, 1971) ÉMEXPORT
építőanyagok
építéstechnológia

HAJDU GYÖRGY (1930, 1970) SZIM
forgácsoló szerszámgépek

HALÁSZ AURÉL (1924, 1970) VVE
gépelemek

KASZAP KÁLMÁN (1934, 1961) BME Gépészmérnöki Kar. Műszaki Mech. Tsz.
műszaki mechanika

KESZLER JÓZSEF (1930, 1970) Ajkai Timföldgyár
vegyipari gépek

KISS LÁSZLÓNÉ (1929, 1971) Élelmiszeripari Főiskola, Budapest
élelmiszeripari gépek

SCHMIDEG IVÁN (1933, 1971) VEIKI
digitális hírközlés

SZEPPELFELD SÁNDOR (1931, 1970) Lenin Kohászati Művek műszaki kibernetika

SZŐNYI JENŐ (1927, 1971) VVE
szállítógépek

SZÜCS LÁSZLÓ (1931, 1971) Ho Si Mink Tanárképző Főiskola, Eger

TAKÁCS ISTVÁN (1931, 1970) Kőbányai Gyógyszerárugyár
vegyipari gépek

TAKÁCH GYULA (1916, 1971) BME Építőmérnöki Kar Vasútépítési Tsz.
útépítés vasútépítés gépelemek

TAMÁSKOVICS NÁNDOR (1933, 1971) KGM TKI
kohászati kemencék

VISONTAI JÓZSEF (1934, 1971) BME Építőmérnöki Kar Acélszerkezetek Tsz.
építészeti mechanika
fémszerkezetek

VECSERNYÉS LAJOS (1928, 1970) TÁKI
spektroszkópia

A KÖZLEKEDÉSTUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

HARMATI SÁNDOR (1912, 1970) KMP Vasúti Főoszt.
Közlekedési üzem
Közlekedésgépészet

A kiadásért felel az Akadémiai Kiadó igazgatója

Műszaki szerkesztő: Helle Mária

A kézirat nyomdába érkezett: 1972. II. 14. — Terjedelem: 23.8 (A/5) ív,

72.73119 Akadémiai Nyomda, Budapest — Felelős vezető: Bernát György

51,— Ft

Megjelent 1972. VIII. 10.

Index: 26.499

5152

MŰSZAKI TUDOMÁNY

A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA MŰSZAKI TUDOMÁNYOK OSZTÁLYÁNAK KÖZLEMÉNYEI

SZERKESZTI: MAJOR MÁTÉ

45. KÖTET
3—4. SZÁM

AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST 1972

MŰSZ. TUD.

MŰSZAKI TUDOMÁNY

A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA MŰSZAKI TUDOMÁNYOK OSZTÁLYÁNAK KÖZLEMÉNYEI

SZERKESZTŐ BIZOTTSÁG
BARTA ISTVÁN, BÖLCSKEI ELEMÉR, GESZTI P. OTTÓ,
LÉVAI ANDRÁS

SZERKESZTŐSÉG: BUDAPEST V., MÜNNICH FERENC UTCA 7.
KIADÓHIVATAL: BUDAPEST V., ALKOTMÁNY UTCA 21.

A *Műszaki Tudomány* változó terjedelmű füzetekben jelenik meg. Négy füzet alkot egy kötetet.

A kéziratok a következő címre küldendők:

Magyar Tudományos Akadémia
Műszaki Tudomány
Budapest V., Münnich Ferenc utca 7.

Ugyanerre a címre küldendő minden szerkesztőségi levelezés.

A közlésre el nem fogadott kéziratokat a szerkesztőség lehetőleg visszajuttatja a szerzőhöz, de felelősséget a beküldött kéziratok megőrzéséért vagy továbbításáért nem vállal.

A *Műszaki Tudomány* előfizetési ára kötetenként 60 forint. Belföldi megrendelések az Akadémiai Kiadó (Budapest V., Alkotmány utca 21. Pénzforgalmi jelzőszám 215—11488), külföldi megrendelések a „Kultúra" Könyv- és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat (Budapest I., Fő utca 32., Pénzforgalmi jelzőszám: 218—10990) útján eszközölhetők.

SZIGETELT FÁZISVEZETŐJŰ SZABADVEZETÉK

GESZTI P. OTTÓ*
AZ MTA LEVELEZŐ TAGJA
és
PATKÓ JÁNOS

[Beérkezett 1971. július 5-én]

Szigetelt fázisvezetőjű nagyfeszültségű szabadvezetékek vizsgálatával kapcsolatban a laboratóriumi körülmények között vékony szigetelőréteg alkalmazása mind a koronajelenségeket, mind a kapcsolási túlfeszültségekkel szembeni hajlamot jelentősen javította. Elképzelhető, hogy egy megfelelő szigetelőanyag megtalálása esetén a gyakorlatban is jelentős műszaki és gazdasági előnyöket hozhat egy szigetelt fázisvezetőjű szabadvezeték.

1. Bevezetés

Nagyfeszültségű szabadvezetékek építésénél jelentős gondot okozna a fázisvezetők szigetelési problémái. Itt elsősorban a fázisvezetők levegő álta való szigetelésére gondolunk. Ez a szigetelés ui. stacioner üzemvitel esetében részlegesen letörhet, ami a koronajelenséget okozza.

Tranziens állapotban nagyfeszültségű vezetékekről lévén szó, itt me kell említeni a kapcsolási túlfeszültségeket, amelyeknek hatására átütések következhetnek be a fázisvezető és a föld, és esetleg két fázisvezető között.

Kézenfekvő gondolat egy olyan megoldás megvizsgálása, amelynél a fázisvezetőkön vékony, sima felületű, öntisztító szigetelőréteg helyezkedik el amely még a vezeték termikus terhelhetőségét nem, vagy alig változtatja meg, és amely szigetelés viszont alkalmas lehet arra, hogy mind a koronajelenség, mind a kapcsolási túlfeszültség okozta átívelések tekintetében e jelenségeket kedvezően befolyásolja.

Elképzelésünk szerint ugyanis egy ilyen vékony, nem a teljes fázisfeszültségre, hanem annak csak töredékének szigetelésére alkalmas szigetelő rétegnek a hatása többek között abban kell hogy megmutatkozzék, hogy a váltakozó feszültség hatására a vezető közelében nem, vagy alig keletkezik tértöltés (normális körülmények között, stacioner folyamatoknál), kapcsolási túlfeszültségeknél pedig a levegőben való átütést akadályozza meg, ill. késlelteti. (Egy ilyen szigetelőréteg elképzelhető a szigetelőláncok végén levő szerelvényeken is.)

* Prof. Dr. Geszti P. Ottó, Budapest XII., Jagelló u. 13.

Jelen tanulmányban — egyelőre laboratóriumi körülmények között — megvizsgáltuk, hogy szigetelt vezető esetén hogyan alakultak:

a) a sugárzási jelenségek és

b) a kapcsolási túlfeszültségekkel kapcsolatos átütések.

Tudatában vagyunk annak, hogy a laboratóriumi kísérletsorozat kedvező eredmények esetében sem feltétlenül konkluzív valóságos körülményekre. Meggyőződésünk szerint még ebben az esetben is hosszadalmas kutatómunkára van szükség abban a vonatkozásban, hogy egy szigetelt fázisvezetőjű rendszer hogyan viselkedik szennyezett körülmények között, különböző fajta csapadékok esetében és természetesen egy olyan műanyag szigetelés kikísérletezését is igényli, amelyik szabadban, hosszú időn keresztül stabil és a különböző szabadvezetékekkel kapcsolatos feltételeknek megfelel.

2. A sugárzás

120 kV és annál nagyobb névleges feszültségű távvezetékek tervezésének egyik fő szempontja a sugárzási veszteségek megfelelő figyelembevétele. Kedvezőtlen körülmények között a veszteségeken túlmenően jelentős lehet az akusztikai, valamint a rádiózavarás is.

A sugárzási veszteségek megnövekedését a sugárzási küszöbfeszültség (U_k) csökkenése okozza. Ez különösen akkor okozhat nagy zavarokat, ha a sugárzás küszöbfeszültsége a fázisfeszültség alá csökken. Az U_k sugárzási küszöbfeszültség többek között a vezetőre felvitt szigetelőbevonattal is növelhető.

Nagyfeszültségű távvezetékek vezetői az üzemi feszültségen már kismértékben sugároznak. A sugárzás intenzitása kedvezőtlen időjárási viszonyok esetében nagyobb, mint amit a sugárzási küszöbfeszültség csökkenése okoz.

A fentieket mérésekkel is megvizsgáltuk. A mérésekkel kapcsolatos néhány elméleti összefüggést a Függelékben adunk meg.

A méréseknél használt sodronyok adatai:

$D_{csupasz}$ = 18 mm (átmérő)
D_{szig} = 24 mm
V_{szig} = 3 mm (szigetelőréteg vastagsága)
$d_{elemi\ szál}$ = 2,5 mm
n_{AC} = 7 db
n_{Al} = 30 db

A méréseket 3 különböző sodronyon végeztük el:

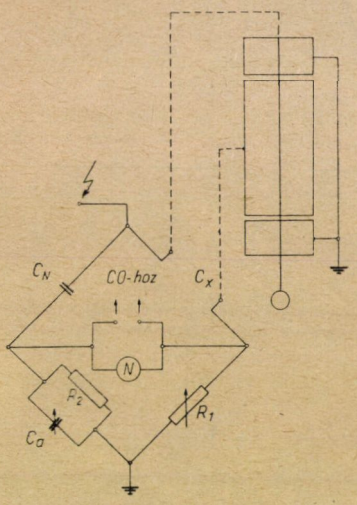
a) csupasz sodronyon;

b) „F" jelű műanyag bevonattal ellátott sodronyon;

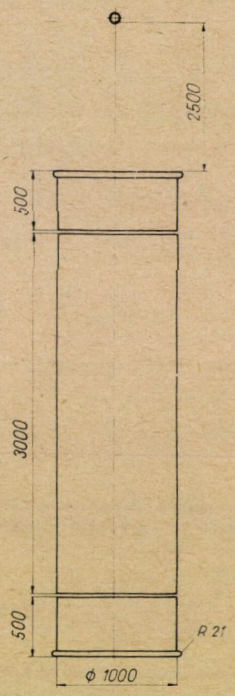
c) „K" jelű műanyag bevonattal ellátott sodronyon.

Végeztünk továbbá összehasonlító méréseket csupasz, 240 mm², 300 mm², 600 mm² névleges keresztmetszetű sodronyokon, és 30 mm, továbbá 50 mm átmérőjű sima fémhengeren.

A sugárzási küszöbfeszültség növekedését a veszteségi tényező (tan δ) feszültségfüggéséből határoztuk meg. A veszteségi tényezőt Schering-híddal



1. ábra. Schering-hidas mérés kapcsolási vázlata



2. ábra. A próbatest vázlata

mértük (1. ábra). (Ez a híd alkalmas a sugárzás megindulásának közvetlen kimutatására is.) A hídhoz egy oszcilloszkóppal csatlakoztunk, amelynek az ernyőjén közvetlenül látható volt a sugárzás megindulása. Az így meghatározható U_k minden esetben kisebb a tan $\delta(U)$ görbékből meghatározható U_k értékeknél.

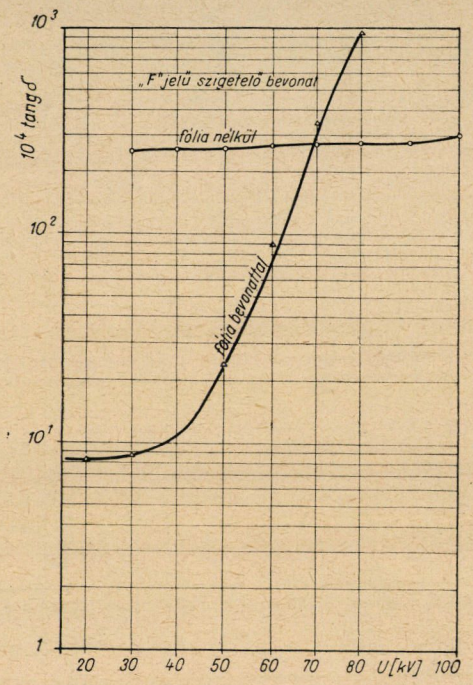
A veszteségi tényező mérésekhez egy alkalmas elektródaelrendezést kellett kialakítani. A 2. ábrán látható henger tengelyében helyeztük el a vizsgálandó sodronyt. A külső henger két vége a középső résztől el van szigetelve, s az 1. ábrán látható módon van bekötve.

A 3. ábrán látható az „F" jelű bevonattal ellátott kábel („b" mérés) mérési eredménye bevonva, ill. fémfóliával is bevonva. A fémfólia szerepe az

volt, hogy a sodronyátmérő növekedésének (műanyag helyett fém) a hatását demonstrálja.

A 4. ábrán az előbbihez hasonlóan a „K" jelű bevonattal ellátott kábel („c" mérés) mérési eredménye látható, ugyancsak fémfólia bevonattal és anélkül.

Az 5. ábrán együtt látható az „a", „b" és „c", vagyis a csupasz, az „F" jelű bevonattal és a „K" jelű bevonattal ellátott sodrony mérési eredménye.



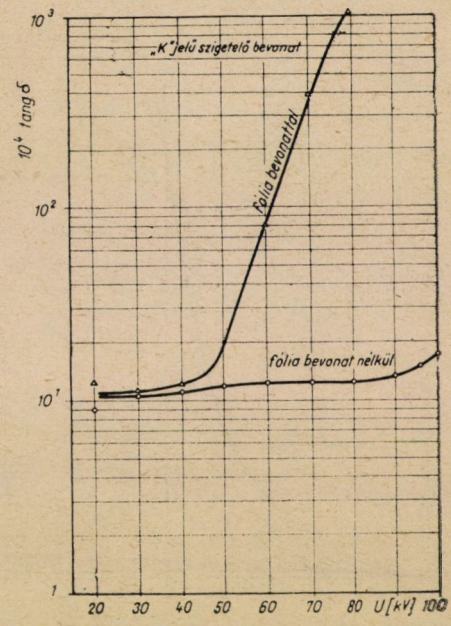
3. ábra. tan δ (U), „F" bevonat esetében 100 kV-ig mérve

Jól látható, hogy pl. 120 kV-os hálózat fázisfeszültségének környékén ($120/\sqrt{3} \approx 70$ kV) a „b" és „c" bevonattal ellátott sodrony is kedvezőbb a csupasz sodronynál.

$$\tan \delta_a \approx 820$$
$$\tan \delta_b \approx 270$$
$$\tan \delta_c \approx 12{,}5$$

Ez azt jelenti, hogy a „c" esetben a „K" jelű bevonat alkalmazásával a veszteség kb. $820/12{,}5 \approx$ 65-öd része a csupasz sodrony alkalmazásakor fellépő koronaveszteségnek.

A bevonattal ellátott sodrony másik előnye, hogy míg a feszültség kismértékű növekedése esetében (10%) alig, vagy egyáltalán nem növekedik a veszteségi tényező, addig a csupasz sodrony koronaveszteségе rohamosan nő.



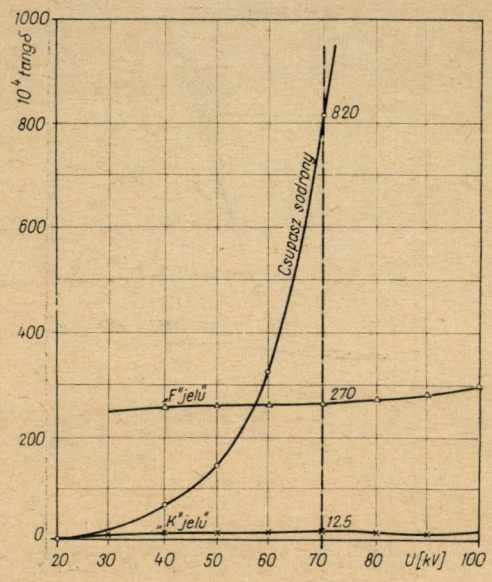
4. ábra. tan δ (U), „K" bevonat esetében 100 kV-ig mérve

A műanyag bevonatú sodronyokat még bevontuk fémfóliával is. Ezzel azt akartuk demonstrálni, hogy egyedül a csupasz huzal átmérőjének növelésével is csökkenthető valamelyest az U_k feszültség. (A nem tökéletesen sima fémfóliafelület miatt ezek a görbék a „b" és „c" esetben csak tájékoztató jellegűek.)

A mérési eredmények egyértelműen azt mutatják, hogy a feszültségtartomány jelentős (és az alkalmazási zónába eső) részén a koronaveszteség (és a tértöltés is) egy nagyságrenddel, sőt ezt meghaladóan csökkenthető szigetelőréteggel. A szigetelőréteg e kedvező hatása csak egészen nagy feszültségeken vész el (amelyek már amúgy is az alkalmazási zónán kívül vannak).

A mérések azt is kimutatták, hogy a veszteségcsökkenés sokkal nagyobb, mint amit az átmérőnöveléssel és a felületi simasággal el lehet érni. A szigetelőréteg által — amely esetleg egy egészen vékony réteg is lehet — felvett százalékos nagyságrendű feszültség nem magyarázza a nagymérvű javulást.

A veszteségcsökkenés fő oka abban látjuk, hogy a szigetelőréteg, mely végtelen rezervoirnak tekinthető, nem teszi lehetővé elektronok kilépését a fémből, és így csak a radiális, igen csekély értékű szivárgási áramnak megfelelően alakulhatnak ki tértöltések, ill. a tértöltések kialakulása erősen fékeződik és gyengül.



5. ábra. tan δ (U), csupasz, „F" és „K" bevonat esetében 100 kV-ig mérve

3. Kapcsolási túlfeszültségek

Kísérletet végeztünk a fenti szigetelt sodronyokkal, ill. a fenti sodronyok külső átmérőivel azonos átmérőjű, két párhuzamos csupasz csővel, melyeknek tengelytávolsága 190 cm volt. Az alkalmazott feszültséghullám 300/3000 μsec pozitív polaritású volt. A mérések szerint a két csupasz cső között az 50%-os átívelési feszültség kb. 1000 kV_{csucs}-nak felelt meg, melyhez kb. 900 kV_{cs} withstand voltage tartozott.

A mérések a szigetelt sodronyok esetében a következő eredményt adták. Három lökést 1200 kV_{cs}-al minden további nélkül kibírt. 1300 kV_{cs}-al két lökést bírt ki, a harmadikat nem. Így a withstand voltage 1200 kV_{cs}-ra tehető és ezért a szigetelés okozta withstand voltage növekedés 300 kV_{cs} mellett 33%-kal egyenértékű. Ilyen értelemben a kapcsolási túlfeszültségekkel szemben az ellenállóképesség jelentékeny javulását lehetett tapasztalni a 3 mm vastag szigetelőréteg jelenléte következtében.

FÜGGELÉK

1. A mérésekkel kapcsolatos néhány elméleti összefüggést itt adunk meg.

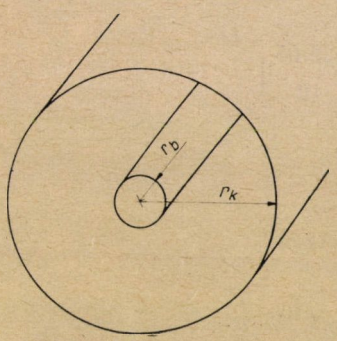
$$E_{max} = fE_{átl} = \frac{1}{\eta} E_{átl},$$

ahol $f > 1$, az inhomogenitási tényező,
$\eta < 1$, az ún. kihasználási tényező,

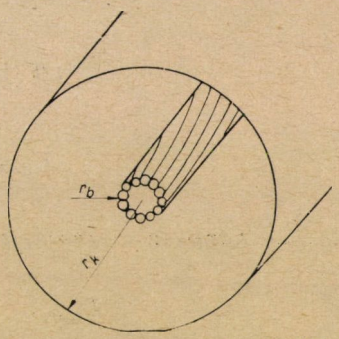
vagy pedig

$$E_{max} = kU = \frac{U}{\alpha},$$

ahol k — geometriától függő jellemző,
α — az ún. virtuális elektródatávolság.



6. ábra. Koaxiális henger sima felületű vezetővel



7. ábra. Koaxiális henger sordonyvezetővel

A maximális térerősséget — mint a feszültség függvényét — két esetre határoztuk meg (az általunk használt sodronyon, ill. hengerre):

a) a vezető felülete sima,

b) a vezető elemi szálakból áll (sodrony).

Az egyik esetben — koaxiális hengerekről van szó — a belső elektróda legyen egy sima fémhenger (6. ábra), a második esetben pedig egy $n = 37$ elemi szálból álló sodrony (7. ábra). A koaxiális henger geometriai adatai:

$r_b = 0{,}9$ cm,
$r_k = 50$ cm,
$n' = 37$ (elemi szálak száma),
$n = 18$ (a külső koszorúban levő huzalok száma).

Az első esetben a térerősséget a következő összefüggés adja:

$$E_{max} = \frac{U}{r_b \ln \frac{r_k}{r_b}} = \frac{1}{0{,}9 \ln \frac{50}{0{,}9}} U = 0{,}278\, U.$$

A második esetben

$$E_{\max\,sodr} = \frac{\lambda U}{r_b \left(n \ln \frac{r_k}{r_b} + \ln \frac{\lambda}{n} \right)},$$

ahol

$$\lambda = n \left(1 + \frac{1}{n \sin \frac{\pi}{n}} \right) = 18 \left(1 + \frac{1}{18 \sin \frac{\pi}{18}} \right) = 22{,}65.$$

Így

$$E_{\max\,sodr} = \frac{\lambda}{r_b \left(n \ln \frac{r_k}{r_b} + \ln \frac{\lambda}{n} \right)} U =$$

$$= \frac{22{,}65}{0{,}9 \left(18 \ln \frac{50}{0{,}9} + \ln \frac{22{,}65}{18} \right)} U,$$

$$E_{\max\,sodr} = 0{,}348\, U.$$

A sodrony felületén a térerősség ebben az esetben

$$\frac{E_{\max\,sodr}}{E_{\max}} = \frac{0{,}348\, U}{0{,}278\, U} = 1{,}25\text{-ször}$$

nagyobb.

Kiszámítottuk a levegőben a maximális térerősséget, ha az r_b sugarú vezetőt műanyag bevonattal vettük körül (8. ábra). A méretek a következők:

$r_1 = 0{,}9$ cm
$r_2 = 1{,}2$ cm
$r_3 = 50$ cm.

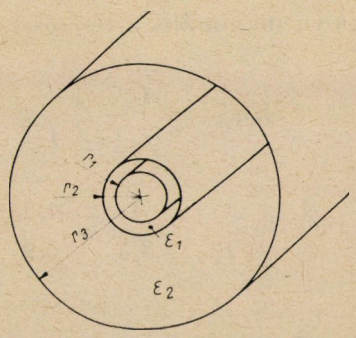
Az r_2—r_1 helyen ε_1, az r_3—r_2 helyen ε_2 permittivitású anyag van.

$$\varepsilon_1 = 3{,}5,$$

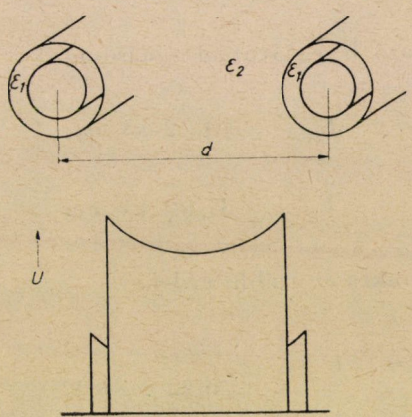
$$\varepsilon_2 = 1 \text{ (levegő)}.$$

A szigetelőanyagban a maximális térerősség az r_1 sugáron ébred:

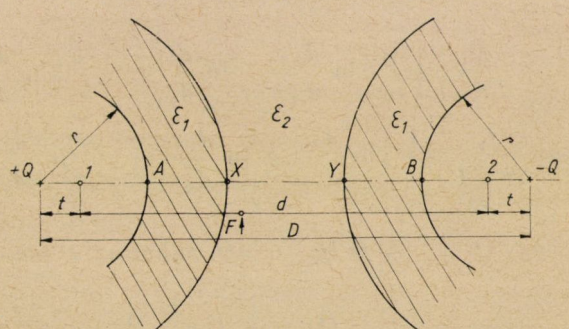
$$E_{1\max} = \frac{U}{r_1} \frac{1}{\varepsilon_1 \cdot A}.$$



8. ábra. Koaxiális hengerelrendezés rétegzett szigeteléssel



9. ábra. Egymást nem burkoló párhuzamos hengerek rétegzett szigeteléssel és a potenciáleloszlás



10. ábra. Egymást nem burkoló hengerek, rétegzett szigeteléssel (nagyítás)

A levegőben az r_2 sugáron maximális a térerősség:

$$E_{2\max} = \frac{U}{r_2} \cdot \frac{1}{\varepsilon_2 \cdot A},$$

ahol

$$A = \frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} = \frac{1}{3{,}5} \ln \frac{1{,}2}{0{,}9} + \frac{1}{1} \ln \frac{50}{1{,}2} = 3{,}8.$$

Ezek után

$$E_{1\max} = \frac{1}{r_1 \varepsilon_1 A} U = \frac{1}{0{,}9 \cdot 3{,}5 \cdot 3{,}8} U = 0{,}084\, U,$$

$$E_{2\max} = \frac{1}{r_2 \varepsilon_2 A} U = \frac{1}{1{,}2 \cdot 1 \cdot 3{,}8} U = 0{,}22\, U,$$

$r_1 = 0{,}9$ cm-hez tartozó levegőátütési szilárdság

$$E_{\text{üt}\, r_1} = 40/\sqrt{2} \text{ kV/cm},$$

$r_2 = 1{,}2$ cm-hez

$$E_{\text{üt}\, r_2} = 37/\sqrt{2} \text{ kV/cm}$$

érték tartozik. Számunkra ez utóbbi érdekes.

$$E_{2\max} = 0{,}22\, U \rightarrow U = \frac{E_{\text{üt}\, r_2}}{0{,}22} = \frac{37}{0{,}22 \cdot \sqrt{2}} = 119 \text{ kV}.$$

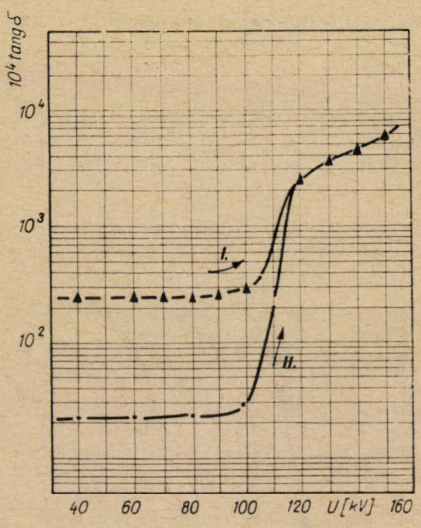
Ezen a feszültségen már letörik a levegő villamos szilárdsága.

A valóságos viszonyokat nem a koaxiális hengerelrendezés közelíti meg legjobban, hanem a párhuzamos kis sugarú hengerek tere, ahol a vezetőn műanyag bevonat van (9. és 10. ábra). Rétegezett szigetelők terén a feszültség:

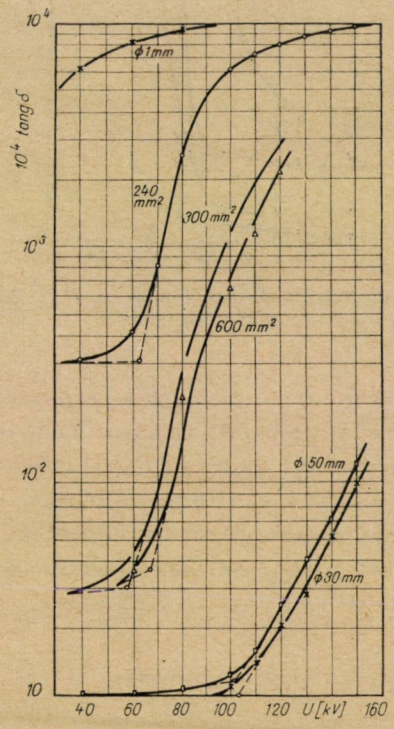
$$U_{AB} = \frac{Q_1}{2\pi \varepsilon_0 l} \left[\frac{1}{\varepsilon_1} \left(\ln \frac{d_{X1}}{d_{A1}} + \ln \frac{d_{B1}}{d_{Y1}} \right) + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{d_{Y1}}{d_{X1}} \right] - \frac{Q_2}{2\pi \varepsilon_0 l} \left[\frac{1}{\varepsilon_1} \left(\ln \frac{d_{A2}}{d_{X2}} + \ln \frac{d_{Y2}}{d_{B2}} \right) + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{d_{X2}}{d_{Y2}} \right].$$

Tételezzük fel, hogy $Q_1 = +Q$ és $Q_2 = -Q$, akkor az F pont helyén a térerősség:

$$E_F = \frac{Q}{2\pi \varepsilon_F \varepsilon_0 l} \left(\frac{1}{d_{1F}} + \frac{1}{d_{2F}} \right).$$



11. ábra. tan δ (U), „F" jelű sodrony 150 kV-ig mérve

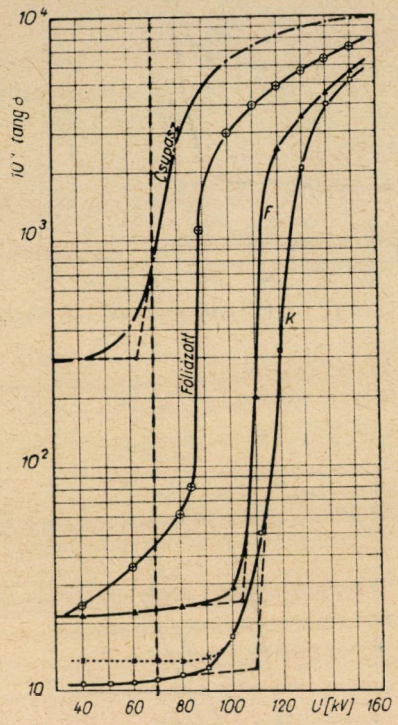


12. ábra. tan δ (U), csupasz sodronyok és csövek 150 kV-ig mérve

Az előbbi két összefüggés segítségével a térerősséget az

$$E_F = U_{AB} \frac{1}{2\frac{1}{\varepsilon_1}\left[\left(\ln\frac{d_{X1}}{d_{A1}} + \ln\frac{d_{B1}}{d_{Y1}}\right) + \frac{1}{\varepsilon_2}\ln\frac{d_{Y1}}{d_{X1}}\right]} \cdot \frac{1}{\varepsilon_F}\left(\frac{1}{d_{1F}} + \frac{1}{d_{2F}}\right)$$

összefüggés adja.



13. ábra. tan δ (U), 240 mm² sodrony csupaszon, fóliázva, „*F*" és „K" jelű bevonattal ellátva, 150 kV-ig mérve

2. A teljesség kedvéért a méréseinket kiterjesztettük 150 kV-ig. A 11. ábrán az „F" bevonattal ellátott vezető látható. Az I. jelű görbe az első, a II. jelű a második mérési eredményt mutatja. Feltehetően olyan üregek lehettek a műanyag szigetelésben, amelyek az első mérésnél még sugároztak, a második mérésnél már nem (az első mérésnél elmerevedhettek).

A 12. ábrán láthatók a csupasz sodronyok és csövek tan $\delta(U)$ görbéi, míg a 13. ábrán a 240 mm²-es sodrony tan $\delta(U)$ görbéi csupaszon és szigetelve.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki dr. BÁN Gábornak, aki a kapcsolási túlfeszültségekkel kapcsolatos méréseket végezte.

Freileitungen mit isolierten Phasenleitern. Im stationären Betrieb von Hochspannungs-Freileitungen kann die elektrische Festigkeit der Luft teilweise zusammenbrechen. was Corona-Erscheinungen verursacht; während transienter Zustände, insbesondere unter der Wirkung von Schaltüberspannungen entstehen Überschläge zwischen Phasenleiter und Erde, eventuell zwischen Phasenleitern. Zwecks Beseitigung bzw. Reduzierung dieser Fehler chlag en die Verfasser vor, die Phasenleiter mit einer dünnen, glatten, selbstreinigenden ssolierschicht zu überziehen. Die thermische Belastbarkeit der Leitung ändert sich so nicht Ider nur in unbedeutendem Maße. Die Meßergebnisse zeigen daß die kritische Spannung oer Strahlung (und auch der Coronaverlust) unter der Wirkung der die Oberfläche des Seils dberziehenden Isolierschicht bedeutend abnehmen und daß auch die Widerstandsfähigkeit üegenüber den Schaltüberspannungen sich beträchtlich erhöht.

Overhead Lines with Insulated Phase Conductors. In the stationary operation of high-voltage overhead transmission lines, the dielectric strength of the air may break down partially causing thus corona effects; during transient states, short-circuits, mainly due to the switching overvoltages, may occur between a phase conductor and the earth or between phase conductors. For eliminating or reducing these effects the authors propose to coat the phase conductors with a thin, smooth, self-cleaning insulation layer. The thermal load capacity of the line would not change at all, or only insignificantly. The measuring results showed that the critical voltage (and the corona loss too) are considerably reduced by the insulating layer covering the surface of the cable, and the resistance to switching overvoltages is considerably improved as well.

AZ ÁLTALÁNOS ÉS KOMPENZÁLT FOGAZAT SZERKESZTŐ MÓDSZEREI A FOGASKERÉKBOLYGÓMŰVEKBEN

TERPLÁN ZÉNÓ*
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK DOKTORA

[Beérkezett 1972. március 24-én]

1. Bevezetés

Közismert, hogy egyenes fogazatú hengeres kerékpár kapcsolódásában az általános fogazat nyújtja a legkedvezőbb fogazati jellemzőket [1—3]. Éppen ezért a fogaskerék-bolygóművek fogaskerékpárjaiban is célszerű volna az általános fogazatot megvalósítani. A szakirodalom e kérdésről kevés támpontot nyújt [4—8], célszerű tehát összefoglalni az alkalmazás lehetőségeit.

A legbonyolultabb fogaskerék-bolygómű is mindig felbontható alapegységekre:

elemi bolygóműre külső-külső kapcsolódással (1. ábra);

elemi bolygóműre külső-belső kapcsolódással (2. ábra);

egyszerű bolygóműre (3. ábra);

kettős bolygókerekes bolygóműre a bolygókerék külső és belső kapcsolódásával (4. ábra);

kettős bolygókerekes bolygóműre a bolygókeréknek csak külső kapcsolódásával (5. ábra);

kettős bolygókerekes bolygóműre a bolygókeréknek csak belső kapcsolódásával (6. ábra).

Az 1—6. ábrák egyszerűsített bolygómű vázlatok, ahol *1* a háznak, *2* a napkeréknek, *3* a bolygókeréknek, *4* a gyűrűkeréknek és *k* a karnak jele.

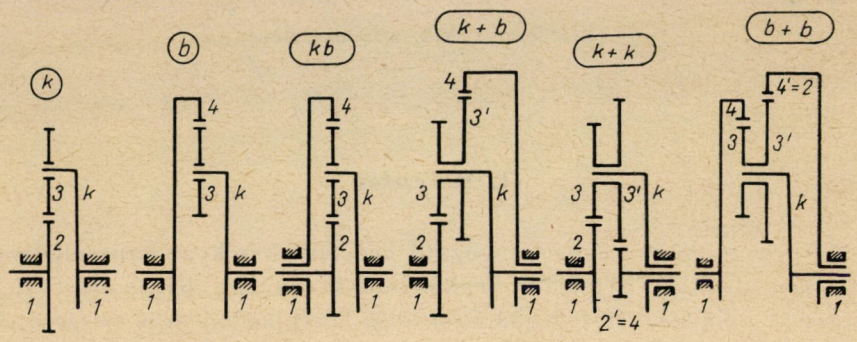
Mivel egy-egy alaptípus szabatos elnevezése eléggé hosszú, helyettük az ábrán feltüntetett egyszerű betűjeleket használjuk, amelyekben a **k** a külső-külső és **b** a belső-külső kapcsolódásra utal, s így az ábrák sorrendjében megkülönböztethetjük a következő betűjeles alaptípusokat: **k**, **b**, **kb**, **k** + **b**, **k** + **k**, **b** + **b**.

Az irodalomból ismert általános fogazat [1—3] minden további nélkül megvalósítható a **k** és **b** típusú bolygóművekben.

* Prof. Dr. Terplán Zénó, Miskolc-Egyetemváros, Nehézipari Műszaki Egyetem.

A **k + b**, **k + k** és **b + b** típusokban is megvalósítható az általános fogazat azzal a megszorítással azonban, hogy a két fogaskerékpár-kapcsolódás közül az egyiknek tengelytávolsága már kötött (éppen a másikéval azonos).

A legtöbb problémát a **kb** típus jelenti azzal a kötöttséggel, hogy ugyanannak a bolygókeréknek kell egyidejűleg a nap- és a gyűrűkerékkel kapcsolódnia.



1. ábra *2. ábra* *3. ábra* *4. ábra* *5. ábra* *6. ábra*

A következőkben összefoglalás olvasható arról, mely szerkesztéseket lehet megvalósítani a **kb** típusú, ún. egyszerű bolygóműben az elemi fogazattól eltérő *kompenzált*, ill. *különleges általános fogazatokra*, ha a foggörbék *körevolvensek*.

2. Kompenzált fogazat kiegyenlített csúszásra

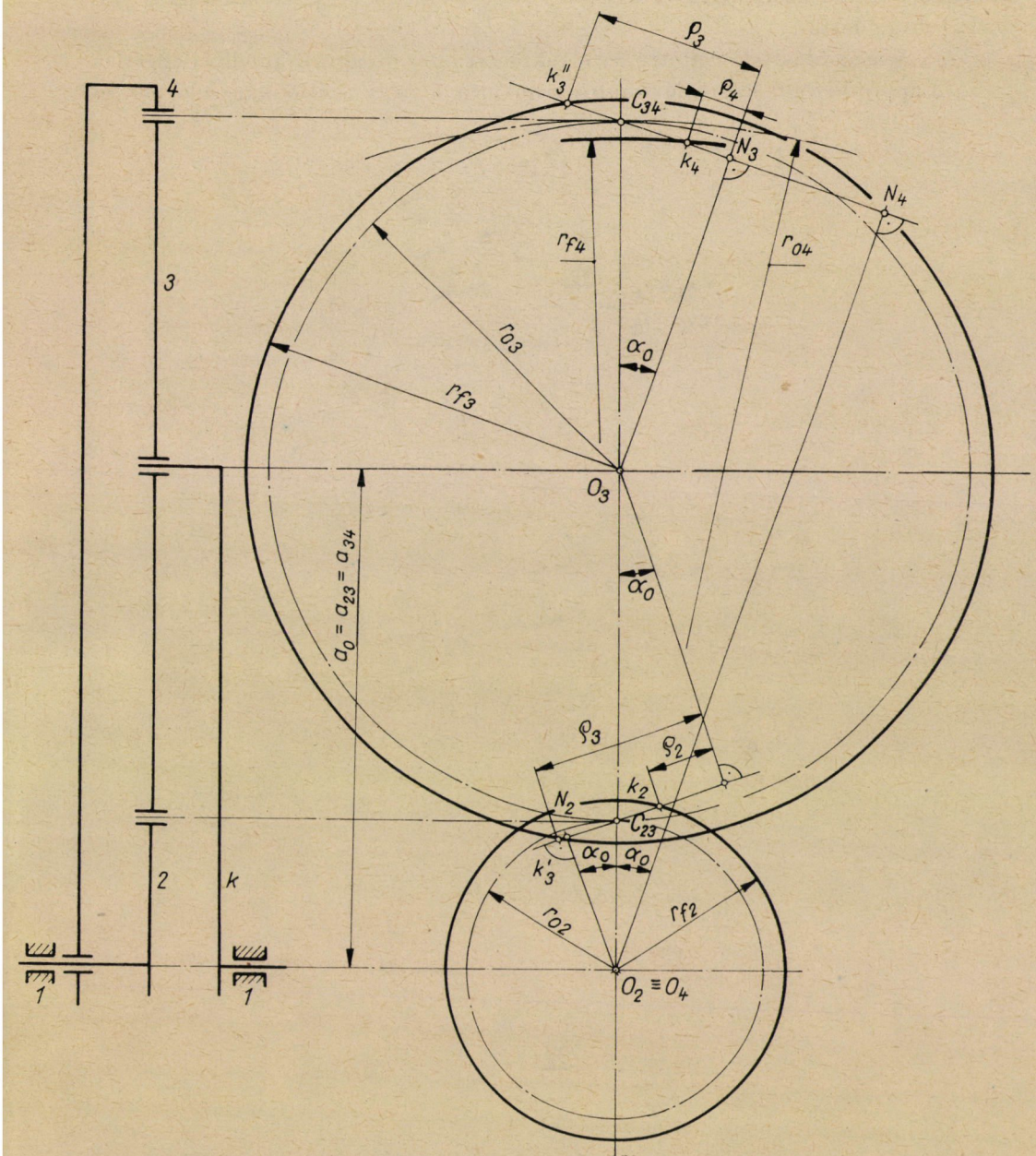
A **kb** típusú bolygómű elemi fogazat kapcsolódásához képest már a kompenzált fogazat is előnyösebb. Ritkán fordul elő ugyanis, hogy az elemi fogazat — egyszerűsége mellett — egyben kedvező üzemi tulajdonságú.

A több fajta lehetőség közül a kompenzált fogazat fizikai alapja a *kiegyenlített csúszás* lehet, amely lényegében azt jelenti, hogy a fogaskerékpár szélső kapcsoló pontjaiban az ún. η *relatív csúszás*

$$\eta = \frac{\varrho_i \Delta\varphi_i - \varrho_j \Delta\varphi_j}{\varrho_j \Delta\varphi_j}, \quad \text{ahol} \quad \varrho_i \Delta\varphi_i > \varrho_j \Delta\varphi_j \tag{1}$$

(ϱ görbületi sugár, $\Delta\varphi$ a Δt időhöz és a legördülési ívhez tartozó középponti szög) értékek kiegyenlítettek, és ugyanakkor egy önkényes határ (pl. 3) alatt legyenek. A relatív csúszás tehát (1) szerint az azonos idő alatt egymáson legördülő foggörbe-szakaszok különbségének viszonya a kisebbik ívhosszhoz.

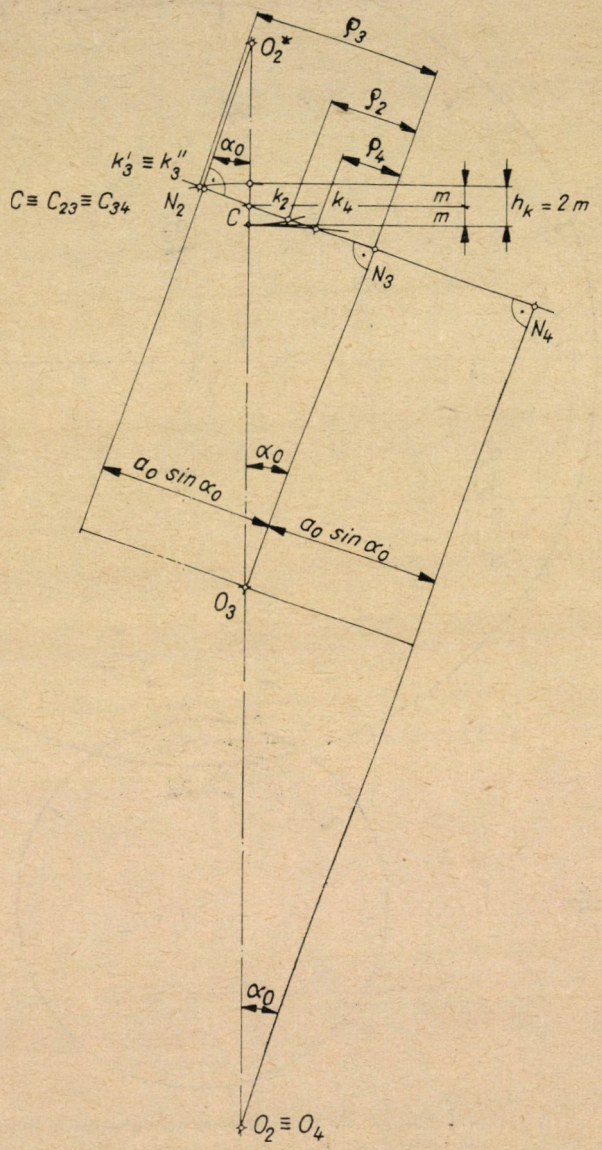
A külső-külső és a belső-külső kapcsolódású hengeres, egyenes fogazatú fogaskerekekre e probléma szerkesztéssel (a *Vörös*-féle szerkesztéssel) [1—3], sőt számítással [9] is megoldott. A **kb** típusú bolygómű esetében a mindkét kapcsolódás szempontjából „közös" bolygókerék *négy* szélső kapcsoló pontot



7. ábra. A **kb** típusú fogaskerék-bolygómű kapcsolódási vázlata elemi fogazatok esetén, feltüntetve a *négy* szélső kapcsoló pontot (k_2, k_3', k_3'' és k_4), amelyeket a fejkörök metszenek ki az α_0 alapprofilszögű kapcsolóvonalakból. A napkerék elemi fogazattal alámetszett

jelent (7. ábra), s ez a kiegyenlített csúszás megvalósítását némiképp bonyolítja. A szerző azonban ezt a kérdést szerkesztéssel is [10], számítással is [11, 12] megoldotta.

A megoldást elősegítette az a tükrözési mód (8. ábra), amellyel egyetlen α_0 alapprofilszögű kapcsolóvonalra redukálta a négy szélső kapcsoló pontot

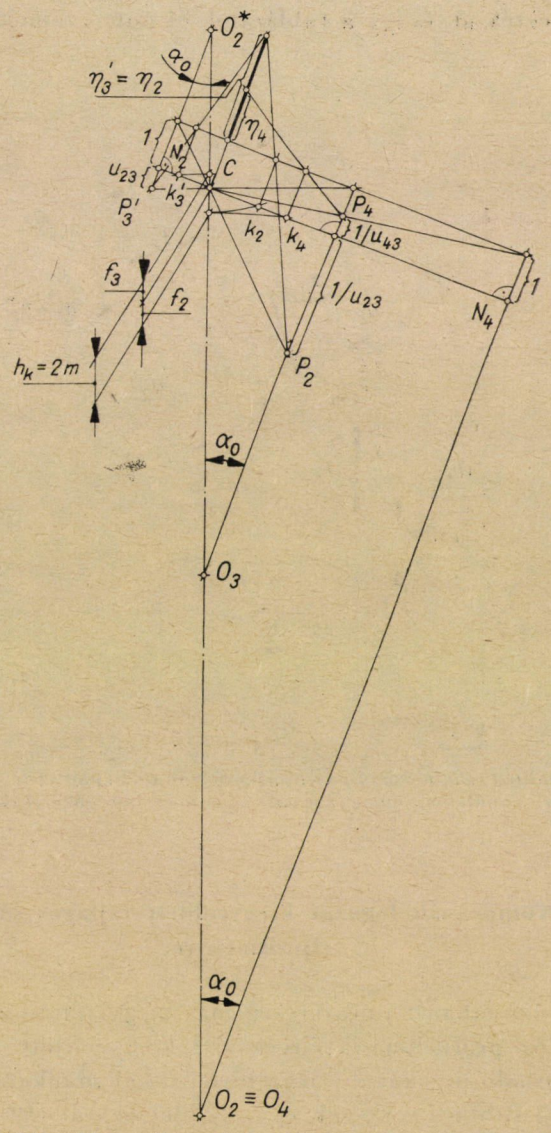


8. ábra. A 7. ábrából készült úgy, hogy a bolygókerék O_3 középpontján átmenő vízszintes képzeletbeli tengely körül a külső-külső kapcsolódást beforgattuk (tükröztük) a belső-külső kapcsolódásra. Így *egyetlen* kapcsolóvonalra kerültek a szélső kapcsoló pontok

(k_2, k_3', k_3'' és k_4), amelyből kettő ($k_3' = k_3''$) egybeesik. Utána bebizonyította, hogy a négy szélső kapcsoló ponthoz tartozó relatív csúszás érték közül mindig: $\eta_3'' < \eta_3'$, és így a négyszeres kiegyenlítés helyett elegendő a háromszoros, amelyben már csak arra kell ügyelni, hogy

$$\eta_2 = \eta_3' > \eta_4;\ \eta_2 = \eta_4 > \eta_3';\ \eta_3' = \eta_4 > \eta_2. \tag{2}$$

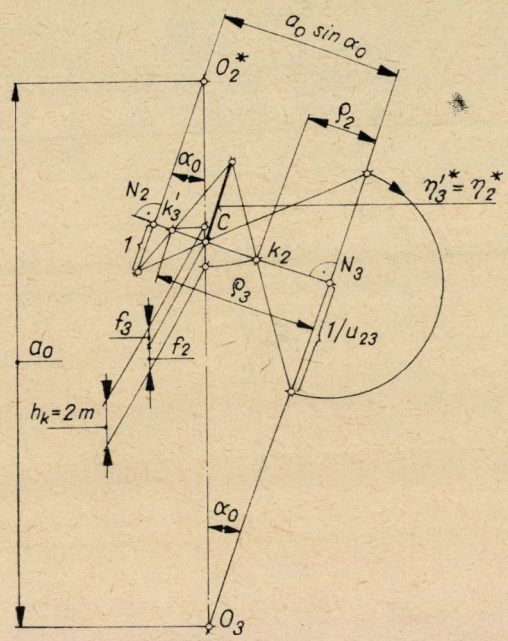
legyen.



9. ábra. A 7. ábra megoldása *kiegyenlített relatív csúszásra* (azaz a h_k közös fogmagasság helyének rögzítése), amikor $\eta_2 = \eta_3' > \eta_4$ (az iteráció szerkesztési vonalainak elhagyásával). A szerző módszere [10—14]

A szerkesztést az irodalomból ismertnek feltételezve adott példát mutat a 9. ábra, amelynél: $\eta_2 = \eta_3' > \eta_4$!

E szerkesztő módszert a szerző számító módszerre is kidolgozta, elektronikus számítógépre programozta [13], és gyorsan használható táblázatokat [12], ill. nomogramot [14] készített. Később munkatársai, APRÓ F. [15] és BUZGÓ J. [16] doktori értekezéseikben ezeket annyiban finomították, hogy a k_4 szélső kapcsoló pontot az interferenciahatárra, k_T pontra (k_T pontot l. a 16. ábrán) helyezték át, és így a táblázatok és nomogramok kissé módosultak [17].



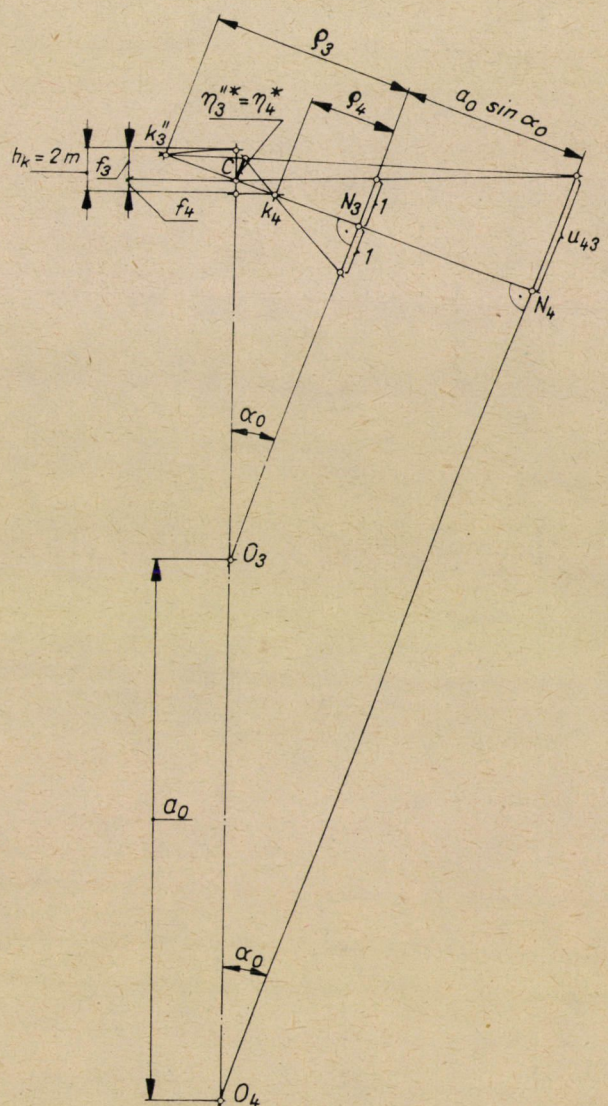
10. ábra. A *kiegyenlített relatív csúszásra* vonatkozó Szota—Scholtz-féle szerkesztés (az iteráció szerkesztési vonalainak elhagyásával) a nap- és bolygókerék kapcsolódására

3. Kompenzált fogazat kiegyenlített fajlagos súrlódási teljesítményre

A szakirodalomban természetesen más kiegyenlítési alapelvek is ismertek (pl. $\pm 0{,}5$-ös profileltolási tényezővel; kiegyenlített fogtővastagsággal; kiegyenlített súrlódó munkával stb.). A szerző két munkatársa, SZOTA GY. és SCHOLTZ P. [18] BÜCHNER K.-nak egy régi dolgozatát [19] elemezve új szerkesztési eljárást dolgozott ki a *fajlagos súrlódási teljesítmények kiegyenlítésére*. E szerint az időben érintkező felületegységre eső súrlódási teljesítménynek

van a legnagyobb szerepe a fogfelületek kopására. Ha tehát a szélső kapcsolási pontokban a fajlagos súrlódási teljesítmények kiegyenlítettek, és nem haladnak meg egy tapasztalati megengedett értéket, akkor a fogaskerékpár geometriai méretei megfelelőek.

A levezetéseket mellőzve egy külső fogazatú kerékpár szélső kapcsoló pontjaiban a következő w fajlagos súrlódási teljesítmények írhatók egy-egy

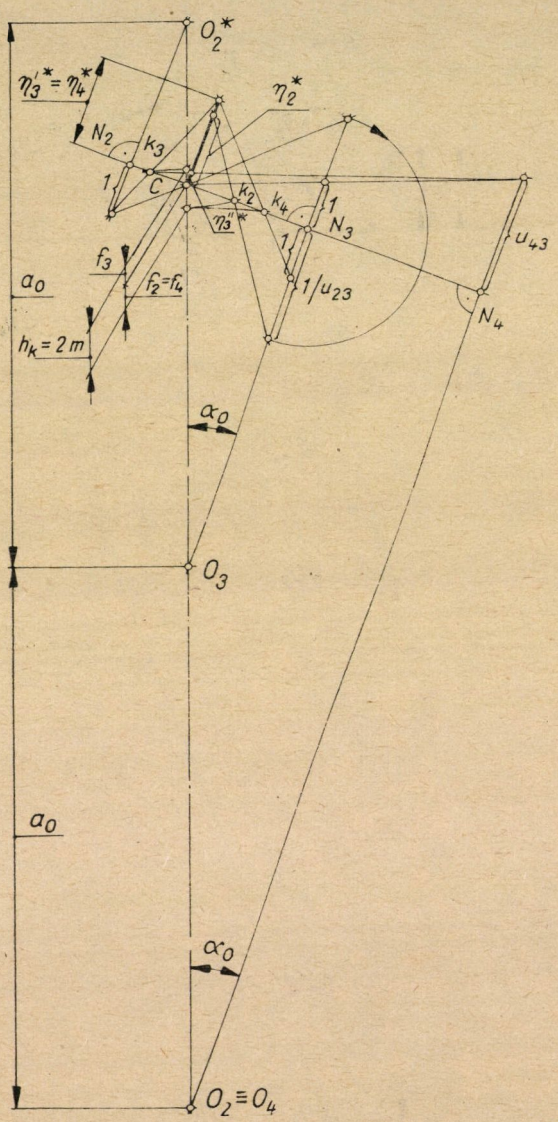


11. ábra. A *kiegyenlített relatív csúszásra* vonatkozó Szota – Scholtz-féle szerkesztés a bolygó- és gyűrűkerék kapcsolódására (az iteráció szerkesztési vonalainak elhagyásával)

kerék lábrészére elemi fogazatot feltételezve:

$$w_{l1} = \frac{\mu F_n}{b} \frac{\omega_1 + \omega_2}{2\pi} \left| \left(\frac{r_{01} \sin \alpha_0}{\varrho_1} - 1 \right) \right|; \tag{3}$$

$$w_{l2} = \frac{\mu F_n}{b} \frac{\omega_1 + \omega_2}{2\pi} \left| \left(\frac{r_{02} \sin \alpha_0}{\varrho_2} - 1 \right) \right|, \tag{4}$$



12. ábra. A **kb** típusú fogaskerék-bolygómű h_k közös fogmagasságának elhelyezése a Szota—Scholtz-féle szerkesztés felhasználásával, de az iteráció szerkesztési vonalainak elhagyásával

ahol μ a súrlódási tényező, F_n a fogkapcsolódás normál ereje, b a fogszélesség, ω a szögsebesség, α_0 az osztókör sugara, ϱ a körevolvens görbületi sugara és α_0 az alapprofilszög. A két fogaskerék adatait az 1 és 2 index különbözteti meg.

A (3) és (4) alapján Szota Gy. és Scholtz P. nagyon egyszerű szerkesztést dolgozott ki a szélső kapcsoló pontokban fellépő w-kel arányos értékek meghatározására (l. [18] 5. ábráját), továbbá iterációval a h_k olyan elhelyezésére, hogy a fajlagos súrlódási teljesítmények kiegyenlítettek legyenek.

A kedvező, kevés vonalból álló szerkesztést kiterjesztették a kiegyenlített csúszásra is. A 10. ábrabeli szerkesztés a nap- és bolygókerék, míg a 11. ábra a gyűrű- és bolygókerék között mutatja be a Szota—Scholtz-féle szerkesztést, ahol η^*-k az η-kal arányos értékek.

Ezek után úgy tűnik, megvan a lehetőség a **kb** típusú bolygómű h_k közös fogmagasságának elhelyezésére is ezzel a szerkesztési módszerrel (12. ábra), de amint látni fogjuk (15. ábra), némi korrekció szükséges.

4. A két szerkesztési módszer összehasonlítása [20]

Ha a két szerkesztési módszert összehasonlítjuk, akkor a 13. ábra a külső-külső, és a 14. ábra a belső-külső kapcsolódás esetére h_k közös fogmagasság elhelyezésére pontosan ugyanazt az eredményt adja. Ebből a szempontból tehát a két módszer egyenértékű. A szerkesztés pontossága szempontjából a Szota—Scholtz-féle módszer pontosabb a Vörös-félénél, mert kevesebb vonalból áll, és a metsződő egyenesek szögei kevésbé hegyesek.

Ha viszont a **kb** típusú bolygóműben alkalmazzuk a kétfajta módszert, akkor a h_k közös fogmagasságra két különböző elhelyezést kapunk.

Nincs ma még átfogó irányelv arra, hogy a többfajta kiegyenlítési mód közül melyik a legjobb. Így tulajdonképpen a szerkesztő mérnöknek „szabad keze" van a tekintetben, melyik módszert alkalmazza a h_k helyének rögzítésére.

Felmerülhet az a gondolat is, hogy a **kb** típusú bolygómű esetén is a Szota—Scholtz-féle egyszerűbb és pontosabb szerkesztési módot kívánja valaki alkalmazni (12. ábra), de változatlanul a kiegyenlített csúszás fizikai alapelv alapján szeretné a h_k-t elhelyezni. Ez is megvalósítható.

Írjuk fel először az (1)-ben általánosan értelmezett relatív csúszást a továbbiakban összehasonlításul szükséges négy szélső kapcsoló pontra (a 7. ábra jelöléseivel):

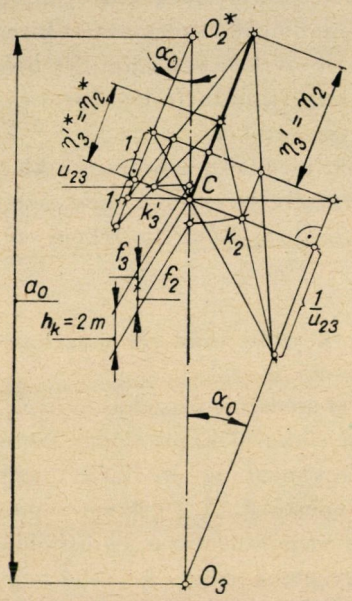
$$\eta_2 = \frac{a_0 \sin \alpha_0 - \varrho_2}{\varrho_2 u_{23}} - 1, \tag{5}$$

$$\eta_3' = \frac{\varrho_3 u_{23}}{a_0 \sin \alpha_0 - \varrho_3} - 1, \tag{6}$$

$$\eta_3'' = \frac{\varrho_2 u_{43}}{a_0 \sin \alpha_0 + \varrho_3} - 1, \tag{7}$$

$$\eta_4 = \frac{a_0 \sin \alpha_0 + \varrho_4}{\varrho_4 u_{43}} - 1, \tag{8}$$

ahol u a fogszámviszony jele.



13. ábra. A *kiegyenlített relatív csúszás* Vörös-, ill. Szota—Scholtz-féle szerkesztési végeredményének (azaz h_k közös fogmagasság azonos elhelyezésének) bizonyítása külső-külső kapcsolódásra

Vegyük ezek után szemügyre a 10. ábrát. A k_2 kapcsoló pontra vonatkozó szerkesztés hasonló háromszögeire felírható, hogy

$$\frac{\eta_2^* + 1}{r_{03} \sin \alpha_0} = \frac{1}{\varrho_2}, \tag{9}$$

amelyből rendezéssel és $u_{23} = |u_{23}|$ átírással

$$\eta_2^* = \frac{u_{23}}{1 + u_{23}} \left(\frac{a_0 \sin \alpha_0 - \varrho_2}{\varrho_2 u_{23}} - 1 \right) \tag{10}$$

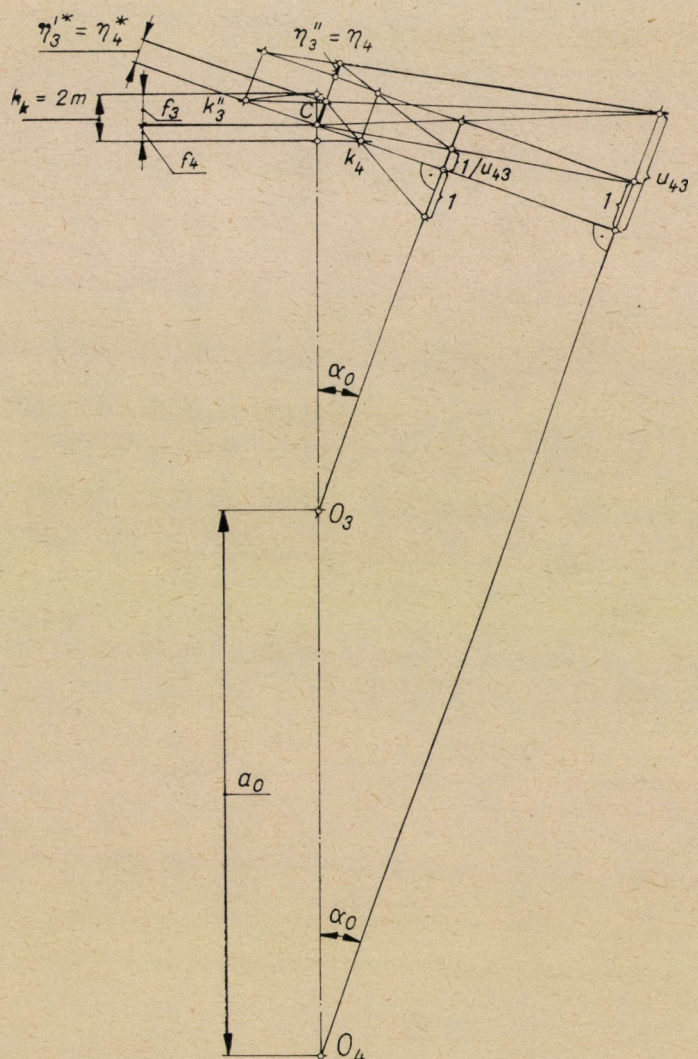
számítható. Ez az (5)-ben felírt η_2-től csak a zárójel előtti, egyébként adott áttételű fogaskerékpár állandójával különbözik. Ezzel bizonyítottuk a 13. ábrabeli szerkesztések azonos végeredményét.

A levezetést mellőzve a k_3' kapcsoló pontra a következő végeredményt kapjuk:

$$\eta_3'^* = \frac{u_{23}}{1+u_{23}}\left(\frac{\varrho_3 u_{23}}{a_0 \sin\alpha_0 - \varrho_3} - 1\right) = \frac{u_{23}}{1+u_{23}}\eta_3'. \tag{11}$$

Így

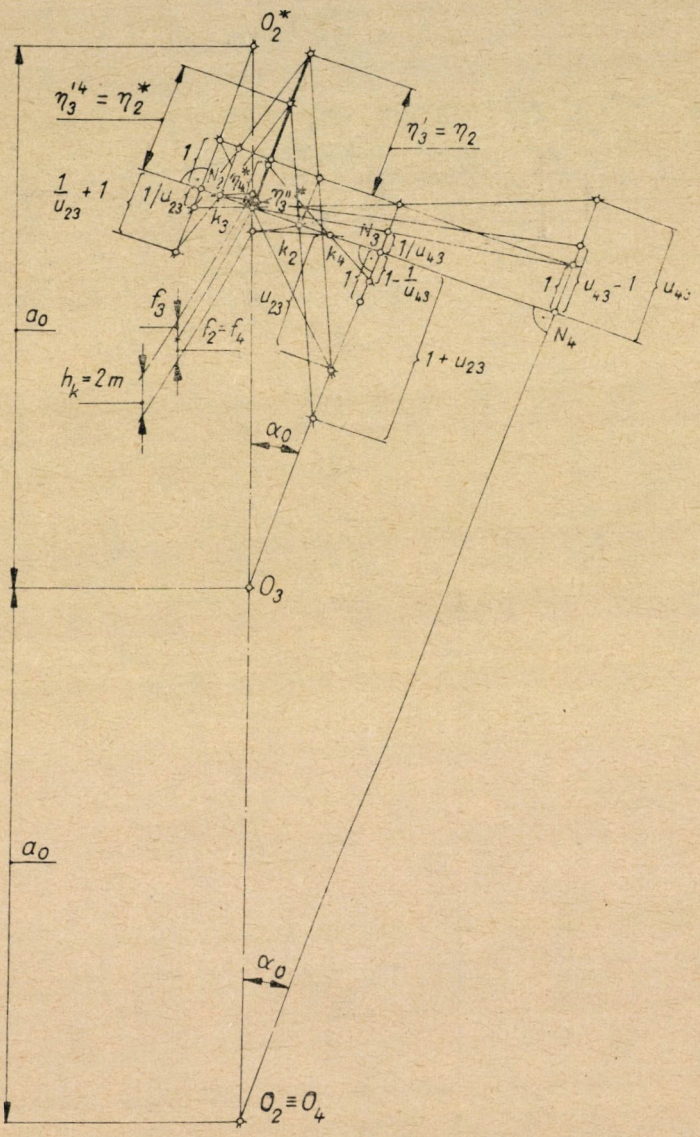
$$\frac{\eta_2^*}{\eta_2} = \frac{\eta_3'^*}{\eta_3} = \frac{u_{23}}{1+u_{23}}. \tag{12}$$



14. ábra. A *kiegyenlített relatív csúszás* Vörös-, ill. Szota—Scholtz-féle szerkesztési végeredményének (azaz h_k közös fogmagasság azonos elhelyezésének) bizonyítása belső-külső kapcsolódásra

Ha ugyanezeket a vizsgálatokat a 11. ábrára is elvégezzük, az

$$\eta_3''^* = \frac{u_{43}}{u_{43}-1}\left(\frac{\varrho_2\, u_{43}}{a_0 \sin \alpha_0 + \varrho_3} - 1\right) = \frac{u_{43}}{u_{43}-1}\,\eta_3'', \tag{13}$$



15. ábra. A **kb** típusú fogaskerék-bolygómű h_k közös fogmagasságának rögzítése a Szota—Scholtz-féle egyszerűbb szerkesztéssel, de a *kiegyenlített relatív csúszás* alapelvvel (azaz módosított pólushelyekkel), az iterációs szerkesztési vonalak nélkül

$$\eta_4^* = \frac{u_{43}}{u_{43}-1}\left(\frac{a_0 \sin \alpha_0 + \varrho_4}{\varrho_4 u_{43}} - 1\right) = \frac{u_{43}}{u_{43}-1}\eta_4, \tag{14}$$

azaz

$$\frac{\eta_3''^*}{\eta_3''} = \frac{\eta_4^*}{\eta_4} = \frac{u_{43}}{u_{43}-1} \tag{15}$$

eredményekre jutunk.

Ha tehát **kb** típusú bolygóművekre akarjuk alkalmazni az egyszerűbb szerkesztést, de úgy, hogy a relatív csúszáskiegyenlítés alapján rögzítjük h_k helyét, akkor új pólusokat kell szerkesztenünk a következőképpen:

$$\left.\begin{aligned} &u_{23} \text{ helyett } u_{k2} = \frac{1+u_{23}}{u_{23}}\, u_{23} = 1+u_{23}; \\ &1 \quad \text{helyett } u_{k3'} = \frac{1+u_{23}}{u_{23}}; \\ &\text{továbbá} \\ &u_{43} \text{ helyett } u_{b3'} = u_{43}-1; \\ &1 \quad \text{helyett } u_{b4} = \frac{u_{43}-1}{u_{43}}. \end{aligned}\right\} \tag{16}$$

A szerkesztés a 15. ábrán látható.

5. Az általános fogazat egyik változata az egyszerű fogaskerék-bolygóművekben

Néhány szakirodalmi utalás [4–8] elemzéséből nyugodtan az ajánlható Apró F. [15] alapján, hogy a **kb** típusú bolygómű külső-külső kapcsolódását adott esetben érdemes *általános* fogazattal megvalósítani ($\alpha_g \approx 24 \ldots 28°$-os kapcsolószöggel), ugyanakkor a belső-külsőjét a már adott bolygókerékkel *kompenzált* fogazattal ($\alpha_0 = 20°$-os, szabványos alapprofilszöggel). Ezzel a megoldással nyilván javulnak a működési jellemzők, ugyanakkor a **kb** típusú bolygóműre jellemző fogszámválasztási szempontok, továbbá az áttételi viszonyok némiképpen megváltoznak.

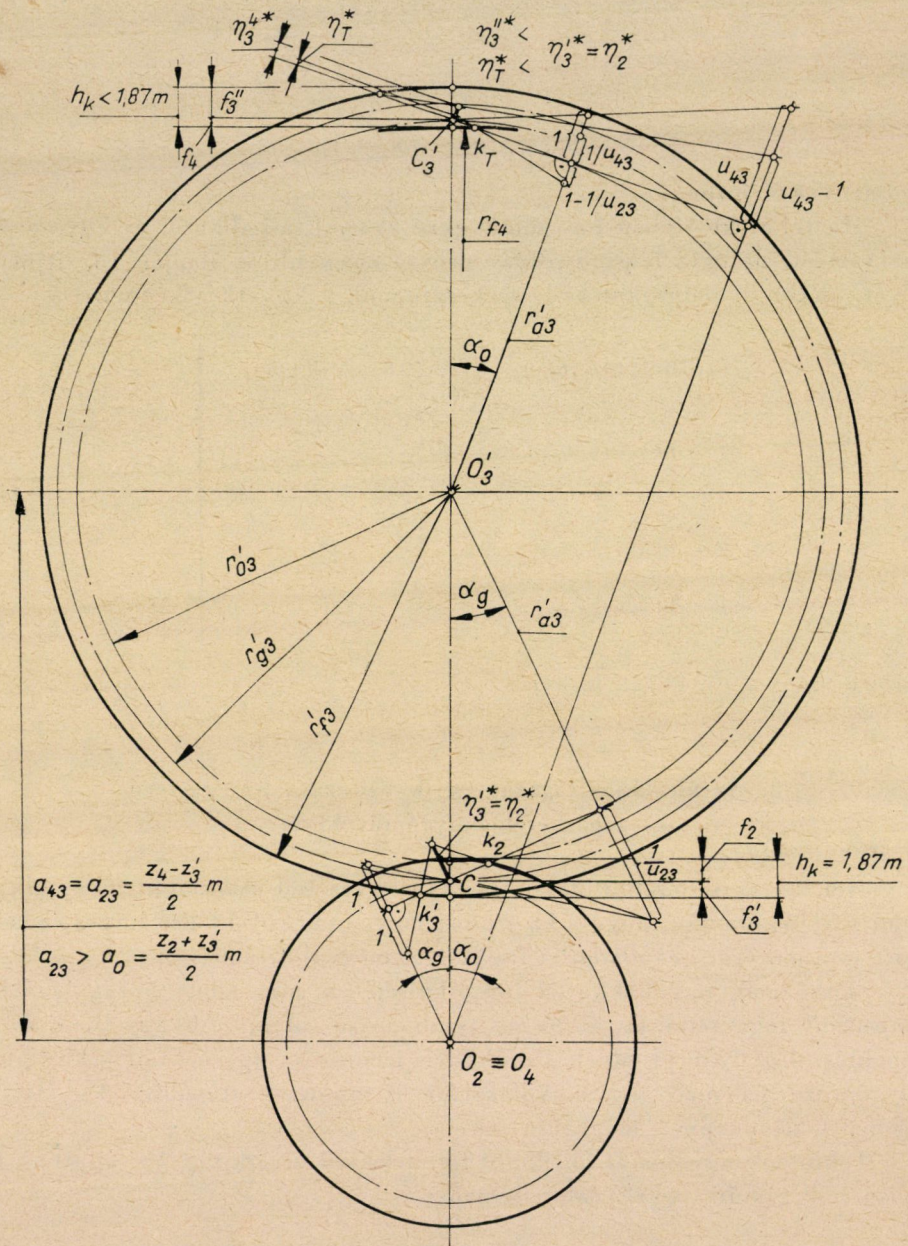
Tekintsük ugyanis át az előbbi feltételekkel megrajzolt 16. ábrát. A **kb** típusú bolygóműre egyébként jellemző

$$z_4 - z_2 = 2z_3 \tag{17}$$

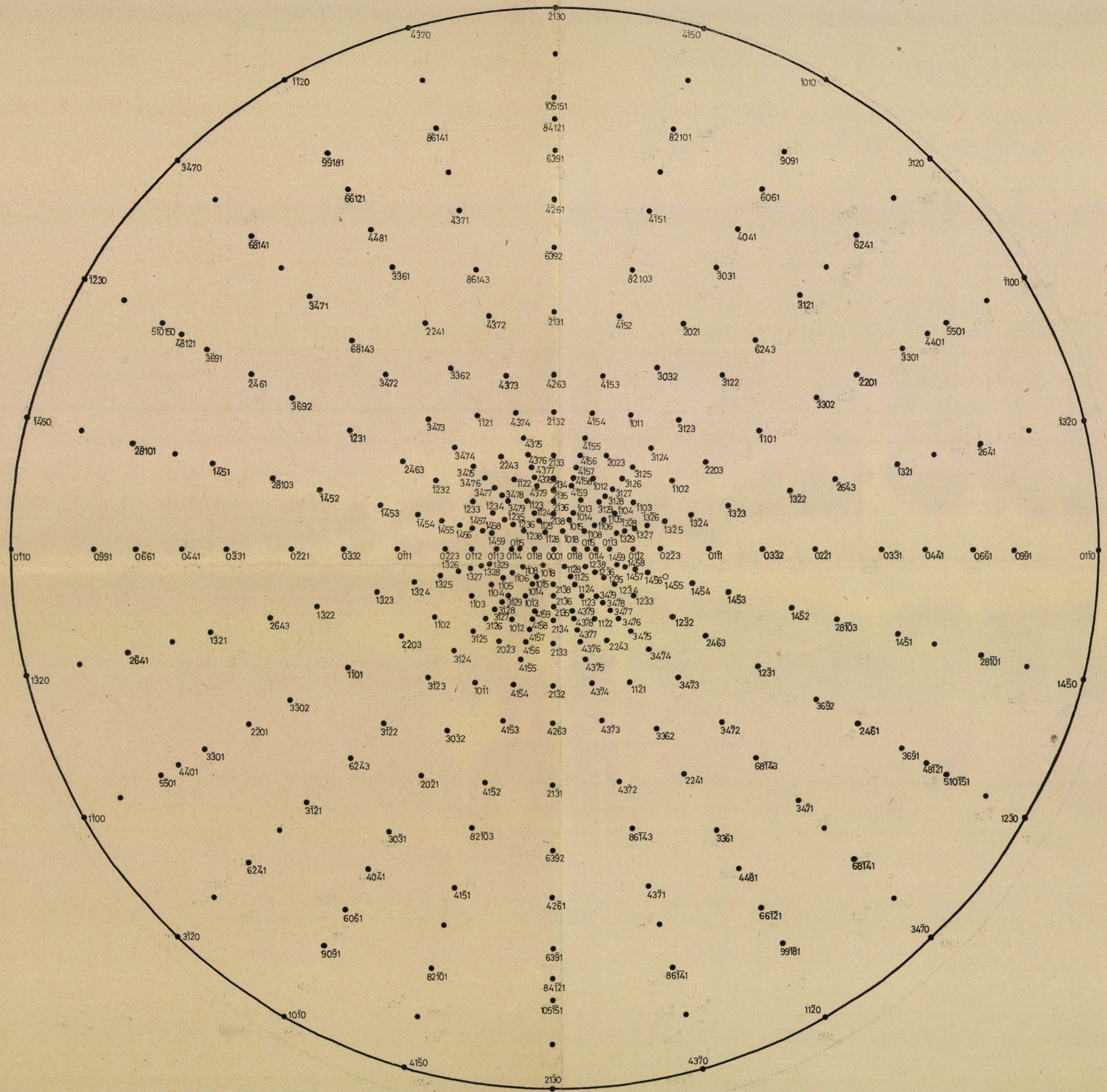
ill.

$$i_{2k} = 1 - u_{42} + u_{42}\, i_{4k} \tag{18}$$

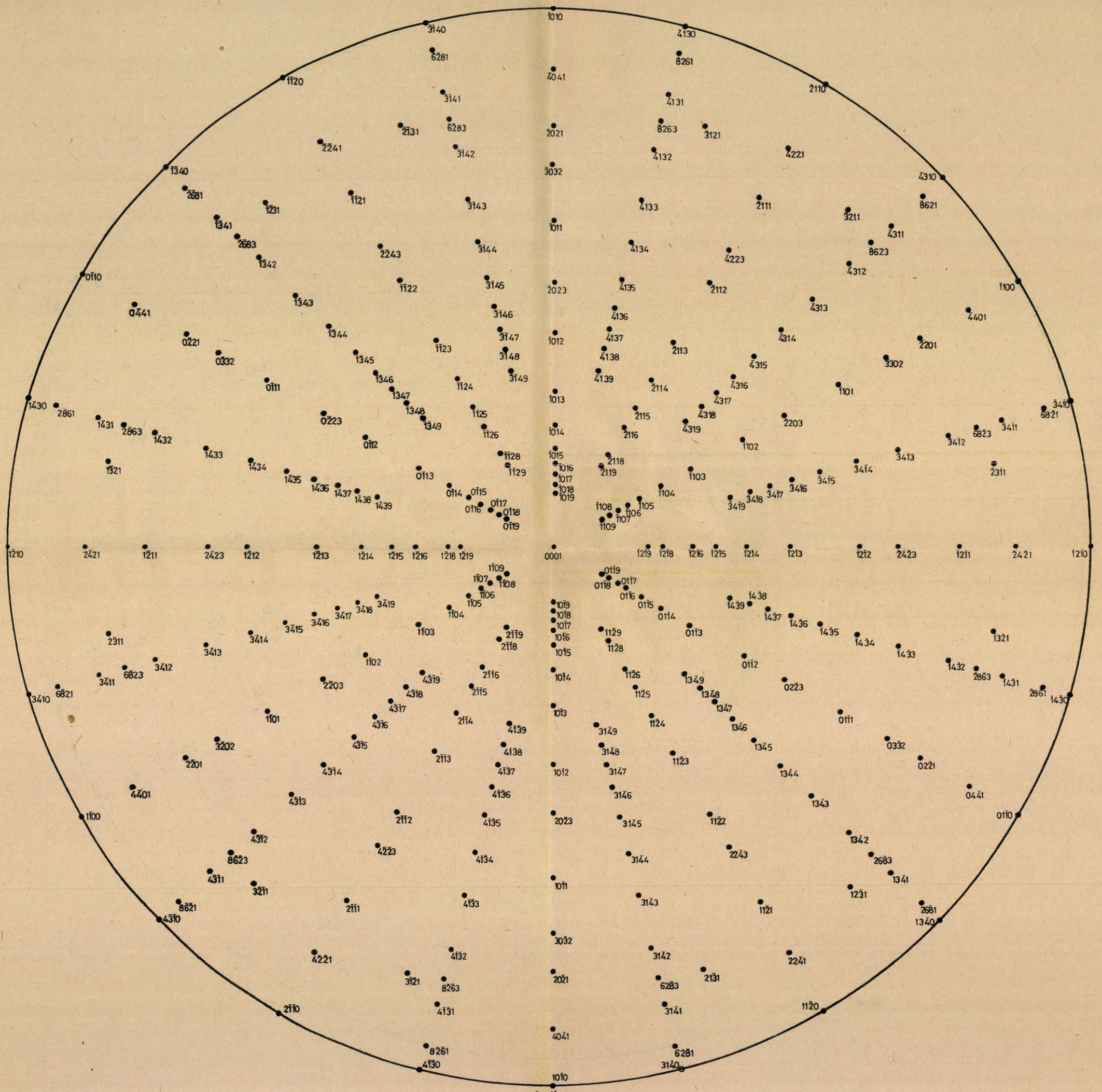
összefüggések csak elemi és kompenzált fogazat esetében érvényesek.



16. ábra. A h_k közös fogmagasság helyzetének rögzítése, ha a **kb** típusú fogaskerék-bolygómű nap- és bolygókerék kapcsolata *általános fogazatú*, ugyanakkor a bolygó- és gyűrűkerék kapcsolata a már adott bolygókerékkel *kompenzált fogazatú*, a bolygókerék fogszámának kismértékű módosításával. Az iterációs szerkesztési vonalakat nem tüntettük fel. A gyűrűkerék fejkörét k_T határozza meg, hogy a bolygókerék lábinterferenciája ne okozzon zavart



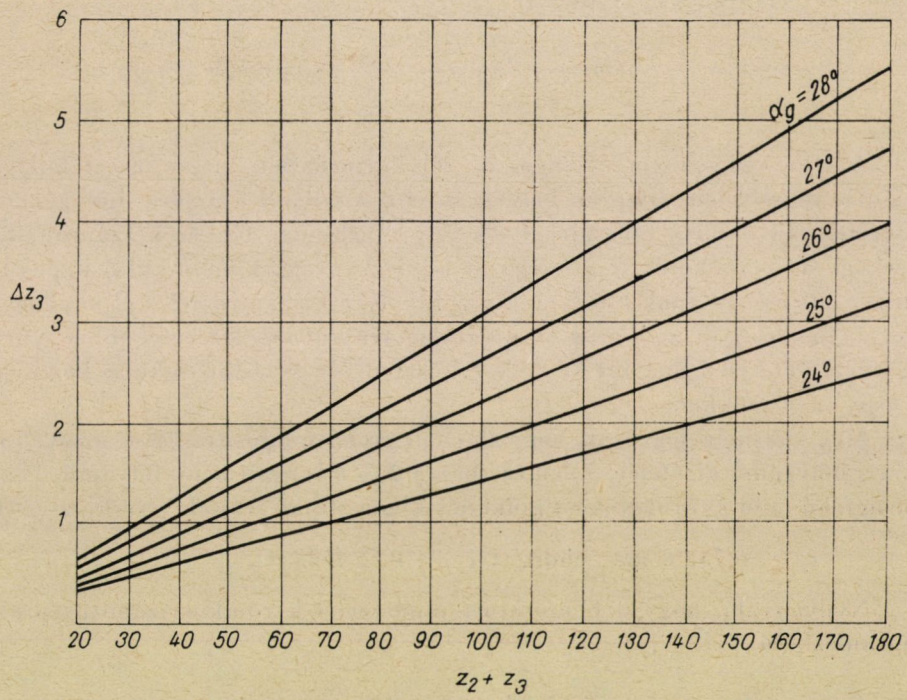
5. ábra


1010
3140
4130
6281
8261
1120
4041
3141
4131
2110
2131
6283
8263
3121
2021
2241
3142
4132
4221
3032
1340
2681
4310
1121
1231
3143
4133
2111
8621
3211
1341
1011
4311
2683
2243
3144
4134
4223
8623
1342
4312
0110
1122
3145
4135
2112
1100
2023
1343
4313
0441
3146
4136
4401
1344
3147
4137
2113
4314
0221
1123
1012
2201
0332
1345
3148
4138
4315
3302
1346
3149
4139
1124
0111
2114
1101
1347
4316
1430
2861
1348
1013
3410
1125
4317
2115
6821
1431
0223
1349
4318
2203
3411
2863
1126
1014
4319
6823
1432
0112
2116
1102
3412
1433
1128
2118
1015
1434
1129
2119
1016
3413
1321
0113
1103
1017
3415
1435
1018
3414
1436
0114
0115
1104
1019
1437
1438
1439
1108
1105
3419
3417
3418
3416
0116
0117
1106
1107
0118
1109
0119
1210
2421
1211
2423
1212
1213
1214
1215
1216
1218
1219
0001
1219
1218
1216
1215
1214
1213
1212
2423
1211
2421
1210
1109
1107
1108
1106
1105
1104
1103
2119
2118
1102
3419
3418
3417
3416
3415
3414
2311
3413
6823
3412
3411
6821
3410
1101
3202
2201
4401
4313
1100
4312
8623
4311
3211
8621
4310
4221
3121
2110
4130
6281
3140
1010
0119
0118
0117
0116
0115
0114
1139
1138
1137
1136
1135
1134
1133
1321
1132
1131
1130
1129
1128
1127
1126
1125
1124
1123
1122
1121
1120
1119
1118
1117
1116
1115
1114
1113
1112
1111
1110
1109
1108
1107
1106
1105
1104
1103
1102
1101
1100
1019
1018
1017
1016
1015
1014
1013
1012
1011
1010
1129
1128
1127
1126
1125
1124
1123
1122
1121
1120
1119
1118
1117
1116
1115
1114
1113
1112
1111
1110
1109
1108
1107
1106
1105
1104
1103
1102
1101
1100
1139
1138
1137
1136
1135
1134
1133
1132
1131
1130
1438
1439
1437
1436
1435
1434
1433
1321
1432
2863
1431
2861
1430
1340
2681
1341
2683
1342
1343
0441
1344
0221
0332
1345
1346
1347
1348
1349
0223
0112
1102
1103
2119
2118
1104
1105
1106
1107
1108
1109
1107
1108
1106
1105
1104
1103
2311
1102
1101
1100
1139
1138
1137
1136
1135
1134
1133
1132
1131
1130
1129
1128
1127
1126
1125
1124
1123
1122
1121
1120
1119
1118
1117
1116
1115
1114
1113
1112
1111
1110
1109
1108
1107
1106
1105
1104
1103
1102
1101
1100
1019
1018
1017
1016
1015
1014
1013
1012
1011
1010
0119
0118
0117
0116
0115
0114
0113
0112
0111
0110
1438
1439
1437
1436
1435
1434
1433
1321
1432
2863
1431
2861
1430
1340
2681
1341
2683
1342
1343
0441
1344
0221
0332
1345
1346
1347
1348
1349
0223
0111
1124
1125
1126
1128
1129
2131
6283
3141
3142
2241
1231
1121
3143
3144
2243
1122
3145
3146
3147
1123
3148
3149
1124
1125
1126
1128
1129
2131
6283
3141
3142
2241
1231
1121
3143
3144
2243
1122
3145
3146
3147
1123
3148
3149
1124
0111
1125
0223
1126
0112
1128
1129
0113
0114
0115
0116
0117
0118
0119
1210
2421
1211
2423
1212
1213
1214
1215
1216
1218
1219
0001
1219
1218
1216
1215
1214
1213
1212
2423
1211
2421
1210
1109
1107
1108
1106
1105
1104
1103
2119
2118
1102
3419
3418
3417
3416
3415
3414
2311
3413
6823
3412
3411
6821
3410
1101
3202
2201
4401
4313
1100
4312
8623
4311
3211
8621
4310
4221
3121
2110
4130
6281
3140
1010
0119
0118
0117
0116
0115
0114
1139
1138
1137
1136
1135
1134
1133
1321
1132
1131
1130
1129
1128
1127
1126
1125
1124
1123
1122
1121
1120
1119
1118
1117
1116
1115
1114
1113
1112
1111
1110
1109
1108
1107
1106
1105
1104
1103
1102
1101
1100
1019
1018
1017
1016
1015
1014
1013
1012
1011
1010
1139
1138
1137
1136
1135
1134
1133
1132
1131
1130
1438
1439
1437
1436
1435
1434
1433
1321
1432
2863
1431
2861
1430
1340
2681
1341
2683
1342
1343
0441
1344
0221
0332
1345
1346
1347
1348
1349
0223
0111
1124
1125
1126
1128
1129
2131
6283
3141
3142
2241
1231
1121
3143
3144
2243
1122
3145
3146
3147
1123
3148
3149
1124
1125
1126
1128
1129
2131
6283
3141
3142
2241
1231
1121
3143
3144
2243
1122
3145
3146
3147
1123
3148
3149
1124
0111
1125
0223
1126
0112
1128
1129
0113
0114
0115
0116
0117
0118
0119

6. ábra

A külső-külső kapcsolódás *általános* és a belső-külső kapcsolódás *kompenzált* fogazatú megoldása esetén (17) helyett

$$\frac{z_4 - z_3'}{\cos \alpha_0} = \frac{z_2 + z_3'}{\cos \alpha_g} . \tag{19}$$



17. ábra. $\Delta z_3 = f(z_2 + z_3; \alpha_g)$ diagram, vagyis az elemi, ill. kompenzált fogazatra érvényes $z_4 - z_2 = 2\, z_3$ egytengelyűségi feltétellel rögzített fogszámokhoz viszonyítva $\Delta z_3 = z_3 - z_3'$ bolygókerék fogszám-módosításának diagramja a nap- és bolygókerék fogszámösszegének, ill. a kapcsolószögnek függvényében, az *általános fogazat* megvalósítására. A z_2, z_3 z_4 fogszámokhoz viszonyítva a z_2, z_3', z_4 kissé módosított fogszámokkal az eredeti kinematikai áttétel némiképp megváltozik. APRÓ F. ábrája [15]

Mivel $\alpha_g > \alpha_0$, a $z_2 + z_3' < z_4 - z_3'$. A fogszámokban tehát bizonyos változtatásokat kell végrehajtani a (17)-beliekhez képest. APRÓ F. [15] a bolygókerék kismértékű megváltoztatását javasolja, s erre a levezetéseinek eredményét diagramban adta közre (17. ábra).

E diagramban pl. egy egyébként elemi vagy kompenzált fogazatra alkalmas (7—15. ábra) $i_{2k} = 6{,}75$ kinematikai áttételt megvalósító $z_2 = 16$, $z_3 = 38$ és $z_4 = 92$ a $z_2 + z_3 = 54$ alapján $\Delta z_3 = 1$-et és $\alpha_g \approx 25°$-ot ad. Ezzel $z_3' = 37$-re módosul. Ezekkel az adatokkal rajzoltuk meg a 16. ábrát.

A h_k közös fogmagasság számításához szükséges előbb az általános és az elemi tengelytávolság arányát meghatározni, amely jelen esetben

$$\frac{a}{a_0} = \frac{z_4 \quad z_3'}{z_2 + z_3'} = \frac{92 \quad 37}{16 + 37} = \frac{55}{53} \approx 1{,}0377 .$$

Ebből [21] alapján (m modullal)

$$\frac{h_k}{m} = 2 \quad \frac{z_2 + z_3'}{2} \; D\left(\frac{a}{a_0}\right) = 2 \quad \frac{53}{2} \, 0{,}004\,776\,7 \approx 1{,}87 .$$

A h_k/m közös fogmagasságot a szélső pontokbeli kiegyenlített fajlagos súrlódási teljesítmény alapján helyezzük el. Ez kijelöli a nap- és bolygókerék főméreteit, továbbá a működés x_2 és x_3' profileltolási tényezők számíthatók. Mivel így a bolygókerék fejkörsugarát is megkaptuk, a belső-külső kapcsolat kompenzált fogazatának összes adata is könnyen kiszámítható a h_k/m elhelyezésével (16. ábra), ill. $x_4 = -x_3'$ profileltolási tényezővel. Itt legfeljebb a gyűrűkerék fejkörét kell k_4 helyett k_T-ből szerkeszteni, s ezért a belső-külső kapcsolat h_k/m-je kissé csökken.

Meg kell még jegyezni, hogy ilyen fogszám-módosítás kissé megváltoztatja a bolygómű áttételét. Jelen esetben a $2 \rightarrow k$ teljesítmény-folyamú, 1-szabadságfokú (álló gyűrűkerekes) működés kinematikai áttétele (szerkesztéssel):

$i_{2k}' \approx 6{,}73$, a már említett $i_{2k} \approx 6{,}75$ helyett.

Nyilvánvaló, hogy a bemutatott módszer elektronikus számítógépre is programozható.

6. Összefoglalás

Az előadottak szerint a viszonylag bonyolult **kb** típusú fogaskerék-bolygóművek is méretezhetők kompenzált fogazatra, vagy a bolygókerék kis fogszám-módosításával a nap- és bolygókerék kapcsolódásában általános, a gyűrű- és bolygókerék kapcsolódásban a már kész bolygókerékhez simuló kompenzált fogazattal. Mindegyik megoldás szerkesztő módszer alkalmazását is megengedi, ezek több változatát mutatja be e tanulmány részben a szerző saját, másrészt munkatársai kutatásait felhasználva.

IRODALOM

1. Botka Imre: Egységes magyar homlokkerék fogazatrendszer. Mérnöki Továbbképző Intézet kiadása. Budapest 1953.
2. Terplán Zénó—Drobni József—Lévai Imre: Gépelemek IV. (Fogaskerekek). 3. kiad. Tankönyvkiadó, Budapest 1967.
3. Vörös Imre: Gépelemek III. (Fogaskerekek). 2. kiad. Tankönyvkiadó, Budapest 1961.

4. BERGSTRÄSSER, M.: Planetengetriebe mit auswechselbarer Übersetzung. — *Maschinenbautechnik* **10** (1961) 209—211.
5. BRASS, E. A.: Nonstandard Spur Gears. — *Product Engineering* **32** (1961), 31—33.
6. DÜMSIC, I. I.: Ob odnom neobjaseszlom uszlovim szborki planetarnogo rjada. — *Vesztnik Masinosztroenija* **38** (1958), 23—25.
7. KUDRJAVCEV, V. N.: Planetarnüe peredacsi. Masgiz. Moszkva 1960.
8. RICHTER, W.: Auslegung von Innenverzahnungen und Planetengetrieben. — *Konstruktion* **14** (1962), 489—497.
9. BUZGÓ József: Fogaskerekek méretezése elektronikus számológéppel. I. (Egyenes, külső, kompenzált fogazat profileltolástényezői.) — KGM Műszaki Tudományos Tájékoztató Intézet, Budapest 1965.
10. TERPLÁN, Z.: Bestimmung des ausgeglichenen relativen Gleitens der Planetengetriebe mit Doppeleingriff des einstufigen Planetenrades. — *Acta Techn. Hung.*, **53** 139—151.
11. TERPLÁN, Z.: Einfache Umlaufgetriebe mit ausgeglichenem Gleiten. — *Konstruktion* **18** (1966), 409—413.
12. TERPLÁN Zénó: A fogaskerékbolygóművek méretezési kérdései. (Kézirat.) A TMB-hez benyújtott és elfogadott doktori értekezés. Miskolc, 1965. 83 o. + 76 o. függelék. Rövidítve megjelent a *Nehézipari Műszaki Egyetem Magyar Nyelvű Közleményei* XV. k.-ben. Miskolc (1967), 449—466.
13. TERPLÁN Zénó: Az elektronikus számítógép felhasználása a fogaskerék-bolygóművek tervezésénél. — „Számítógép alkalmazása a gépiparban" GTE Konferencia anyaga. Miskolc 1969. I/3, 1—8.
14. TERPLÁN Zénó: A fogaskerékbolygóművek geometriai méretezésének újabb eredményei. — „Kinematika-kinetika Kollokvium". Nagymaros 1968, 1—12.
15. APRÓ Ferenc: Egy-szabadságfokú fogaskerék-bolygóművek tervezésének néhány kérdése. (Kézirat.) A Nehézipari Műszaki Egyetem Gépészmérnöki Karához benyújtott és elfogadott értekezés. Miskolc 1967, 1—76.
16. BUZGÓ József: Kiegészítés az egyszerű bolygómű kompenzált fogazatához. (Kézirat.) A Nehézipari Műszaki Egyetem Gépészmérnöki Karához benyújtott és elfogadott doktori értekezés. Miskolc 1969, 1—75.
17. TERPLÁN Zénó—APRÓ Ferenc—BUZGÓ József: Kiegészítés a fogaskerék-bolygóművek korrigált fogazatához. — GTE „II. Fogaskerék Konferenciájának" anyaga. Budapest 1969, 1—10.
18. SZOTA, G.—SCHOLTZ, P.: Bemerkungen zur Zahnkorrektur evolventenverzahnter Geradzahnstirnräder. — *Nehézipari Műszaki Egyetem Idegen Nyelvű Közleményei*, **27** Miskolc (1967), 167—177.
19. BÜCHNER, K.: Beitrag zur Kenntnis der Abnutzungs- und Reibungsverhältnisse der Stirnzahnräder. — *Z. VDI.* **46** (1902) 159—166; 278—284.
20. TERPLÁN, Z.: Dimensionierungsfragen der Zahnrad-Planetengetriebe. Akadémiai Kiadó. Sajtó alatt.
21. LÉVAI Imre—SZARKA Zoltán: D-függvény a fogaskerekek geometriai méretezéséhez. — *A Gépelemek Tanszékének Közleményei.* **203.** sz. Miskolc (1969) 1—23.

Graphical Methods for Designing General and Compensated Gearing in Planetary Gear Trains. The relatively complicated simple planetary gear trains can be dimensioned for compensated gearing, furthermore by a small change of the number of teeth of the planet gear in the engagement of the sun gear and the planet gear and general gearing, and by a compensated gearing adapted to the ready planet gear in the engagement of the planet gear and the ring gear. Each procedure permits the use of graphical methods, several variants of which are presented in the paper using the research results partly due to the author, partly to his colaborators.

Zeichnerische Verfahren für den Entwurf von allgemeinen und kompensierten Verzahnungen für Zahnrad-Planetengetriebe. Die verhältnismäßig komplizierten Zahnrad-Planetengetriebe mit Doppeleingriff des einstufigen Planetenrades können auch für V-Null-Verzahnung bemessen werden: weiterhin durch kleine Änderung der Zähnezahl der Planetenräder mit allgemeiner V-Verzahnung im Eingriff-Sonnenrad-Planetenrad, und durch die an das bereits fertige Plane tenrad angepasste V-Null-Verzahnung im Eingriff-Planetenrad-Hohlrad. Jede Möglichkeit erlaubt auch die Anwendung zeichnerischer Verfahren, die in mehreren Varianten als Ergebnisse der Forschungen teils des Verfassers, teils seiner Mitarbeiter vorgeführt werden.

A RUGALMASSÁGTAN NEMZETKÖZI ÉS HAZAI DINAMIKAI KUTATÁSAINAK ÁTTEKINTÉSE; JAVASLAT A HAZAI ILYEN IRÁNYÚ KUTATÁSOKRA

BOSZNAY ÁDÁM*
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

[Beérkezett 1972. jan. 31]

A hazai és nemzetközi folyóirat-irodalom, kutatási jelentések, szimpóziumok, nemzetközi referáló folyóiratok és személyes tapasztalatok alapján a dolgozat igyekszik kiszűrni a címbeli tudományág kutatásával kapcsolatos általános, valamint tizennyolc pontba foglalva a konkrét kutatási törekvéseket, irányzatokat. A hazai ilyen tárgyú kutatások irányaira, illetve egyes meglevő kutatások intenzifikálására tett javaslattal zárul az áttekintés.

1. Általános kutatási törekvések

Az ilyen irányú kutatásokat elemezve észrevehető az a fontosnak tekinthető, s ezért áttekintésünk elejére állított *törekvés* — s ez összefügg a programvezérelt számítógépek fokozódó elterjedésével, valamint a gyakorlat követelményeivel —, hogy a kutatók nem annyira a feladat pontos megoldását végtelen számú lépésben szolgáltató eljárások szerkesztésére törekednek, hanem inkább véges számú lépéssel megkapható, megközelítő megoldásra.

Ugyanekkor egyre gyakrabban azt a követelményt is támasztják a megoldási módszerekkel kapcsolatban, hogy azok hibája becsülhető legyen, illetve azzal kerülik meg ezt a kérdést, hogy a kérdéses mennyiség számára egyszerre számítanak ki alsó és felső korlátokat.

Mindez azt jelenti, hogy függetlenül attól a matematikai alaktól, amelybe a problémát kiinduló lépésként öntik, többé-kevésbé módszeres finitizálást tűznek ki célul. Az ilyen jellegű megoldások során is szerepet kap a tudományos találékonyság, de más színezetben is, mint azt a „Courant—Hilbert" és a „Frank—Mises", szinte fogalommá vált könyvekben tapasztalhatjuk. A színváltozást ugyanaz az indíték vezérli, mint az egész itt vázolt törekvést: a numerikus hatékonyság, s a gyakorlat számára való minél közvetlenebb hasznosíthatóság.

E törekvések felismerését, s egyúttal e törekvések létezésére vonatkozóan tett állításunk helytállóságának megítélését megkönnyíti az a tény, hogy lényegében ilyen célkitűzéssel külön nemzetközi folyóirat is indult 1969-ben

* Prof. Dr. Bosznay Ádám, Budapest XII., Győri u 12.

International Journal of Numerical Methods in Engineering címen, és az 1970-es (második) kötet terjedelme csaknem a kétszeresére duzzadt az elsőének.

A finitizálás elérésére jelenleg több főbb módszert fedezhetünk fel az irodalomban. Az alábbiakban az általunk az irodalomból kiszűrt, s legfontosabbként ítélt öt, egymást olykor átfedő, vagy vegyesen alkalmazott módszer lényegét foglaljuk össze *a*, *b*, *c*, *d*, *e* betűkkel jelölve. Valamennyinél fontos szerepe van, vagy lehet e következetes mátrixos módszereknek.

a) A kiindulási alapul vett modell kontinuus, s első lépésben — természetesen az anyagra, az alakra, a szóba jöhető elmozdulások és elfordulások nagyságára vonatkozóan tett feltevések alapján — felírják a mozgását visszatükröző parciális differenciálegyenletet, ill. -rendszert. Ezt követi a parciális differenciálhányadosoknak differencia-hányadosokkal, illetve ún. finit kifejezésekkel való helyettesítése. E helyettesítésre általános eljárás nem létezik; az eljárások részben heurisztikusak; az egyes konkrét esetekben követett választás célszerűségét az így nyert közelítés tulajdonságainak az utólagos vizsgálata szokta igazolni. Sok és értékes vizsgálati eredmény van arra nézve, hogy milyen körülmények között csökkennek a hibák a hálópontok sűrítésekor; külön feladat lehet a hiba megfelelő definiálása. Különösen hasznosak azok a legújabban szerkesztett, ebbe a pontba eső eljárások, amelyek valamelyik keresett mennyiség számára garantáltan alsó vagy felső korlátot szolgáltatnak.

b) A kiindulás itt is a mozgást leíró parciális differenciálegyenlet vagy -rendszer. A következő lépésben a megoldást megfelelő függvénysor első n tagjának a segítségével közelítik; az együtthatókat valamilyen, esetleg önkényes (pontosabban inkább a kényelmes számíthatóságot, mint a valóság leírásának minél nagyobb hűségét szem előtt tartó) hiba-definíció alapján a hiba minimalizálása alapján számítják. Ez az eljárás alkalmazható úgy az esetek nagy sokaságában, hogy pl. a rendszer sajátfrekvenciáira felső, sőt javítható, tehát csökkenthető felső korlátot adjon. Ilyen lehet a mozaik- vagy véges elem-módszer.

c) Az e csoportba osztott módszerekben az a közös jellegzetesség, hogy az eredetileg ugyancsak kontínuusnak vett modellhez a közvetlen fizikai-geometriai szemlélet alapján rendel felvett struktúrájú finit modellt; ennek paramétereit is rendszerint a fizikai szemlélet alapulvételével számítja az eredetiéből, lehetőleg egészen egyszerű módon. Például: a kontinuus rendszer rugalmas és kontinuus „vázát" meghagyja, s a tömegeket „koncentrálja", vagy fordítva: a vázat merevnek tekinti, s kontínuusan megoszló tömegűnek, viszont a rugalmas tulajdonságokat igyekszik „koncentrálni". Amennyire kényelmes ez a finitizálásfajta, annyira nehéz általános esetben hibabecslés, vagy akár csak hibaelőjel-megadás.

d) Ez az eljárás-csoport szoros rokonságot mutat az *a)* alatt említettel; a különbség abban mutatkozik, hogy nem közvetlenül az eredeti parciális

differenciálegyenlet (rendszer)-ből indul ki, hanem annak független változó(k) szerint integrált alakjából. A hibabecslés kérdése itt is — akárcsak az *a)* alatti módszereknél — reményteljesebb.

e) A variációs elvek alkalmazásának és szerkesztésének jelenlegi ismételt felvirágzása hozta magával azokat az eljárásokat, amelyek a feladathoz rendelhető variációs integrál integrandusát approximálják finit kifejezésekkel, s ily módon térnek át finit feladatra. Ez a módszer nagy reményekre jogosít a hibabecslést, a hibaelőjel megállapítását illetően.

2. A konkrét kutatás egyes főbb irányai

Az alábbiakban tömör áttekintést igyekszünk adni a tárgykörbe eső, szerző véleménye szerint legfontosabbnak ítélhető nemzetközi és hazai konkrét kutatási területekről, tendenciákról.

1. A megoldási módszerek területén az ismerteken túlmenő, *újabb variációs elvek* megalkotására is törekvés észlelhető. Ennek során pl. igyekeznek a feladattal kapcsolatos mellékfeltételeket a variációs integrál alá bevinni.

2. A Ricci-féle *indexes tenzorszámításnak*, a tenzormezők és kettős tenzormezők, s általában a geometriai objektumok elméletének a rugalmasságtan feladataira való egyre fokozottabb alkalmazásával részben átfogó kijelentéseket könnyebb tenni, részben mód van egészen különleges feladatokat leíró egyenletek megalkotására.

3. Nagy indítékot és segítséget nyertek a megoldási módszerek azáltal, hogy a *funkcionálanalízis* fogalomalkotásait, tételeit, eljárásait sikerült erre a célra hasznosítani. Számos hibabecslés, konvergencia-igazolás, s sok eljárás konvergenciasebességének a növelése köszönhető a funkcionálanalízis térhódításának. A nemlineáris feladatok numerikus megoldhatóságát sokszor egyedül a funkcionálanalízis által szolgáltatott eredményeknek köszönhetjük.

4. A rugalmas, de *nemlineáris anyagegyenletű* anyagokból készült szerkezetek, alkatrészek elmélete is sokat haladt előre, bár ezeknek az eredményeknek jó része kiesik ennek az áttekintésnek a tárgyköréből, mivel ilyen esetekben gyakran kell plasztikus jelenségekkel, illetve termikus, elektromágneses kölcsönhatásokkal is számolni.

5. Különösen stabilitásvizsgálatnál, vagy a stabilitás elvesztése után kialakuló állapot tanulmányozásával merül fel lineáris anyagegyenletű, rugalmas anyagmodell alkalmazásakor is *nemlineáris tagok* figyelembevételének szükségessége *az alakváltozások nagysága miatt*. Sok munka ad módszert ezek pontosabb vagy megközelítő beszámítására.

6. *A szerkezetek stabilitásának* elmélete vagy olyan esetekben tartozik e részbe, ha az egyensúlyi állapot stabilitásáról van ugyan szó, de azt dinamikai

módszerrel kell vizsgálni, vagy ha a — pl. hirtelen lökés hatására előálló — mozgás stabilitásának a számítása a feladat. A rugalmas rendszerek egyensúlyának stabilitásával kapcsolatos problémák pl. akkor vizsgálandók dinamikai módszerrel, ha nemkonzervatív hatások vannak jelen. A jelen áttekintés témája kizárja ugyan a belső anyagcsillapítás okozta nemkonzervativitást, de a szerkezetre kívülről ható erők is okozhatnak nemkonzervatív effektusokat, s így tárgyai lehetnek ennek az összefoglalásnak.

7. A *stabilitás* számára különböző újabb, elméleti vagy gyakorlati szempontból alkalmasabb *definíciókat* is alkotva *módszereket* szerkesztettek az ilyen feladatok megoldására. Tekintetbe veszik a szerkezet anyagának és alakjának ún. kezdeti, eredeti „hibáit" is, s így a gyakorlattal jól összevágó eredményeket nyernek.

Figyelemre méltó új *definíció* az alábbi, N. J. Hoff által, a Szerkezetek dinamikai stabilitásával foglalkozó nemzetközi konferencián 1965-ben adott megszövegezés: „A szerkezet állapota stabilis, ha kezdeti statikus vagy dinamikus egyensúlyi állapota megengedett mértékű megzavarásának hatására csak olyan mértékű elmozdulások keletkeznek, amelyek nagysága a megengedett korlátot nem lépi túl a szerkezet megkívánt élettartama alatt". Úgy tűnik, hogy ez a definíció jól illeszkedik bele az erősödő statisztikai szemléletbe, illetve viszonylag könnyen lehet ennek megfelelően módosítani, illetve kiegészíteni.

8. A valóság minél jobb visszatükrözésének és a gazdaságosság fokozásának szükségességéből erednek azok az intenzív törekvések is, amelyek a szerkezetek külső terheinek *sztochasztikus* változását, vagy maguknak a szerkezetjellemzőknek sztochasztikus változását figyelembe veszik. A fő nehézséget itt nemcsak az elmélet kiépítése jelenti, hanem a nagyszámú, sok időt kívánó, s költséges mérés elvégzése és feldolgozása is, amik a feladatban szereplő, a kiinduláskor ismerendő sztochasztikus jellemzőket megadnák. Bár a károsodások felhalmozódására vonatkozó törvényszerűségek ismerete lényeges momentum ebben a problémakörben, sem ez, sem a töréselmélet általában nem esik e referátum témakörébe.

9. A szerkezetek *optimalizáló tervezése*, amennyiben a hagyományos módszerekkel kívánjuk ezt elérni, általában ritkán vezet ki lényegesen az ösztönösen jónak, optimálisnak gondolt szerkezetek köréből. Lassú társadalmi és technikai változások korszakában ez megengedhető volna, jelenleg azonban mind társadalmi, mind technikai okok miatt forradalmibb változásra van igényünk. Ilyen csak akkor érhető el általában, ha a probléma megfelelő megfogalmazása után rendszerint gépi számítással a változtatható paraméterek nagy tartományát futtatjuk be tervszerűen. A megoldást rugalmas szerkezetek dinamikai problémáival kapcsolatban elméletileg általában a nemlineáris matematikai programozás módszereivel nyerhetjük, sajnos azonban ennek analitikai vagy numerikus eljárásait sokszor nagyon nehéz, vagy egyáltalában

nem lehet alkalmazni. Ezért különböző egyéb metódusokkal kénytelenek élni, úgymint linearizálással, lineáris perturbációval, Monte Carlo-módszerekkel, ún. dinamikus programozással, a legmeredekebb süllyedés vagy a gradiensvetítés módszerével. Bár egyszerűbb, sőt realisztikusabb esetekre is sok megoldás áll rendelkezésre, egyelőre a valóságos esetek egyre hívebb leírására való törekvés akadályba ütközik: meghaladhatja még a jelenlegi legnagyobb számítógépek kapacitását is.

10. Az optimalizálás során gyakran a rugalmas szerkezet *dinamikai merevségére vonatkozó kényszerfeltételt* kell kielégíteni. Ez a kényszerfeltétel megfogalmazható akár a legkisebb sajátfrekvenciára kirótt kényszer alakjában, akár a maximális elmozdulásra (szögelfordulásra), vagy valamely kiragadott pont elmozdulására, illetve két szomszédos kiragadott pont által meghatározott egyenes szögelfordulására, vagy az adott terheknek a támadáspontjuk elmozdulása során végzett virtuális munkájára. Az elmozdulásokkal vagy a virtuális munkával kapcsolatos feltételt impulzusszerű teher, időben lépcsősen változó teher, szinuszosan változó teher esetére szokás előírni.

Ha a kényszerfeltétel sajátfrekvenciára vonatkozóan van előírva, ez a körülmény evidenciába helyezi az ún. *inverz sajátértékproblémákat*, amelyeknek önmagukban is, nemcsak az optimalizáló tervezés során van jelentőségük. E problémáknak az a lényege, hogy adott sajátfrekvenciákkal bíró, esetleg egyéb további előírásoknak is alávetett rendszert kell tervezni. Ezt a feladatot analitikailag csak az inhomogén húrra és a longitudinálisan (ill. torziósan) lengő rúdra oldották meg; egyetlen rúd hajlítólengése esetére létezik ugyan egy iteratív jellegű konstruktív eljárás, azonban ennek konvergenciája elméletileg nem bizonyított. Sajnos az előbb említett, analitikailag megoldott feladattal kapcsolatban nincsen még egyértelmű és általános kritérium arra, hogy milyen a megkötés az egyáltalában előírható sajátfrekvenciára vonatkozóan. Mindenesetre létezik olyan frekvenciaspektrum, amiről bizonyítható, hogy nem lehet semmilyen inhomogén húr frekvenciaspektruma sem.

11. A *rétegezett — szendvics* szerkezetű *lemezek* lengéseivel igen változatos közelítésekkel foglalkoznak. Sík lemez esetén a „kemény" rétegbeli nyíróhatást, a kemény réteg elfordulási tehetetlenségét a saját középsíkjabeli tengely(ek) körül és a „lágy" réteg hajlítómerevségét gyakran figyelmen kívül hagyják, s csak a „lágy" rétegbeli nyírási hatást, elfordulási és transzlációs tehetetlenséget, a kemény rétegnek pedig a transzlációs tehetetlenségét, valamint az egész szerkezet középsíkjába eső tengely(ek) körüli elfordulási tehetetlenségét, és a kemény rétegnél a hajlítási és nyúlási merevség kölcsönhatását. A lágy rétegben kialakuló Poisson-hatást egyszerűsített számítással igyekeznek tekintetbe venni. A görbült középfelületű szendvics-szerkezetek közül főként a hengeres középfelülettűvel kapcsolatban oldottak meg dinamikai feladatokat. Kismértékben görbült gömbközépfelületű réteges szerkezetek saját és gerjesztett rezgéseit is vizsgálták.

Háromnál *több rétegű szendvics-szerkezetek* sajátfrekvenciáit s egyes paramétereknek ezekre gyakorolt hatását is vizsgálták különböző közelítő feltevésekkel.

Ide kívánkozik azoknak a tanulmányoknak a megemlítése is, amelyek olyan szendvics-szerkezetekkel — egyelőre főként *rétegezett rudakkal* — foglalkoznak, amelyeknél a lágy réteg célja a *lengéscsillapítás*. E területen egy *újszerű optimum-feladatot* is felvetettek s megoldottak: adott súlyú lengéscsillapító anyagot milyen alakban kell egy rúdra felvinni, ha bizonyos csillapítási jellemzőket a lehető legnagyobbra kívánunk beállítani.

12. *A rugalmas héjak dinamikájával* kapcsolatos munkákban is sokféle közelítő feltevést alkalmaznak. A héj által elfoglalt térrészt egy ún. vonatkoztatási felülettel és a felületre merőlegesen emelt, megfelelő hosszúságú egyenes vonalak pontjainak halmazával jellemezhetjük. A közelítő feltevéseket a vonatkoztatási felület segítségével fogalmazhatjuk meg kényelmesen. Ezek a következők: a deformáció során:

a) a vonatkoztatási felület normálisai egyenesek maradnak,
b) a vonatkoztatási felület normálisai nem változtatják hosszukat,
c) a vonatkoztatási felület normálisai normálisok maradnak,
d) a vonatkoztatási felületen bevezetett koordináta-vonalak érintői körüli előfordulási tehetetlenség zérus,
e) a vonatkoztatási felület érintőinek irányában a transzlációs tehetetlenség zérus,
f) a héj hajlítómerevsége zérus,
g) a héj tágulási-összenyomódási tekintetben merev.

E közelítéseket különböző kombinációkban alkalmazzák. Értékesek azok az összehasonlítások, amelyek egyik oldalán a háromdimenziós elméletből speciális közelítések nélkül leszármaztatott eredmények, a másik oldalán pedig a fenti közelítések valamilyen rendszerével nyert eredmények állnak. Eredményeken pl. sajátfrekvenciák értendők.

A sajátfrekvencia-számításig kidolgozott héjfeladatok túlnyomó többsége forgáshéjakkal kapcsolatos. A héjrezgést leíró egyenletrendszer kezelésére két főbb módszert követnek a kutatók. Az egyik abban áll, hogy egyetlen ismeretlen függvényt tartalmazó, egyetlen egyenletet igyekeznek előállítani, a másik pedig abban, hogy több ismeretlen függvényt tartalmazó, de elsőrendű differenciálegyenletek rendszerévé próbálják alakítani az eredeti egyenletrendszert.

13. A rugalmas rendszerek dinamikájának problémái között különleges helyet foglalnak el az ún. *paraméteresen gerjesztett rezgések*, és az *ezek* miatt előálló dinamikai instabilitás. E feladatokat, a matematikai formát tekintve, az jellemzi, hogy differenciálegyenleteiben vagy -rendszerében az együtthatók az időnek előírt függvényei. E problémák azért is különlegesek, mert elég sok műszaki katasztrófát lehetett paraméteres gerjesztés okozta instabilitásra visszavezetni.

Rudakkal, tengelyekkel, ívekkel, gyűrűkkel, lemezekkel, héjakkal kapcsolatban oldottak meg sok konkrét feladatot; a megoldás ritkán fejezhető ki zárt alakban a legegyszerűbb tabellált függvényekkel, úgyhogy legtöbbnyire megközelítő számításra van szükség. A feladatokba disszipációs hatásokat is belevesznek, valamint a paraméteres gerjesztéssel egyszerre működő „közönséges" gerjesztést is. („Közönséges"-nek nevezzük itt azt a gerjesztés-típust, amelynek a mozgásegyenletben csak az időtől explicite függő tag felel meg.) Gyakran szükséges és természetes nemlineáris tagok figyelembevétele is.

Megállapítható, hogy ezen a területen különlegesen kevés a kísérleti munka, holott ez igen kívánatos volna.

14. Elsősorban gépészeti jelentőségűek a *rugalmas forgórészek, forgó tengelyek rezgésével és kiegyensúlyozásával* kapcsolatos jelenségek. Ezekbe a dinamikai jelenségekbe sokszor döntően beleszólnak a csapágyazás tulajdonságai, különösen az, hogy ún. izotróp vagy anizotróp-e a csapágy; szerepe van a kenőfolyadékkal működő siklócsapágynál a kenőanyag-rétegnek, e réteg hőállapotának, hatása van a jelenségekre az egész forgórész hőállapotának is. Befolyással bír az a körülmény is, hogy vannak-e jelen állandó vagy változó axiális, vagy közel axiális erők és nyomatékok, s ha változnak, akkor hogyan változik irányuk és nagyságuk. Különleges effektust okoz, ha a forgórész (tengely)-keresztmetszet centrális főtehetetlenségi nyomatékai különbözőek. Kritikus rezgésjelenség kifejlődéséért felelős lehet a belső anyagcsillapítás is. A tengelytömeg vagy a forgórész-tömeg pörgettyűhatása sem hagyható sokszor figyelmen kívül.

A rugalmas forgórész kiegyensúlyozási feladatának megoldása már csak azért is sokféle lehet, mert az ilyen forgórész általában csak egy fordulatszámon egyensúlyozható ki pontosan. Problémát okoz az is, hogy pl. a több részből összekapcsolt nagy turbógenerátor esetén egyenként szokták az egyes részeket kiegyensúlyozni, ami arra vezet, hogy az egész forgórész nem fog általában olyan mértékben kiegyensúlyozottnak mutatkozni, mint az egyes részek. Ennek a kérdésnek az elmélete is több munkának a tárgya.

15. Újabban mint híradástechnikai eszközök egyre növekvő szerepet kapnak a *mechanikai elven alapuló*, de villamos rendszerbe beépített *szűrők*. Kisebb a helyszükségletük, mint a villamos elemekből felépített, hasonló szerepű szűrőknek, s mivel gyakorlati megvalósításukban relatíve kisebb az energiadisszipáció, mint a villamos elemeknél, meredekebb a szűrési karakterisztikájuk. Emellett olcsóbbak is a villamos szűrőknél. Ezek a körülmények szükségessé tették főként rúd- és lemezalakú kontinuumok rezgésegyenleteinek további finomítását, különböző, a frekvencia viszonylagos nagysága miatt lényegessé vált, kisebb frekvenciákon elhanyagolható jelenségeknek a modellbe való bevételét.

16. Ugyancsak híradástechnikai szükségletek — amelyek sok esetben mechanikai mennyiségek pontos és kedvező villamos mérhetőségét vagy

egyéb, nem közvetlenül híradástechnikai feladatok megoldását mozdították elő — hozták előtérbe a *piezoelektromos és a magnetostrikciós* anyagokban lezajló kapcsolt *mechanikai és elektromágneses jelenségek* elméleti vizsgálatára szolgáló modellek finomítását.

17. *Ultrahangnak megfelelő, vagy még nagyobb frekvenciájú mechanikai hatások* már jelentős kölcsönhatásba kerülhetnek termikus, sőt optikai, általában elektromágneses jelenségekkel, valamint fémekben — elég alacsony hőmérsékleten — a villamos vezetésben szerepet játszó elektronokkal. Ilyen nagy frekvenciák esetén már a mechanikai rezgéseket is kvantummechanikai eszközökkel kell, illetve lehet vizsgálni.

18. A minél kisebb súlyra való tervezés egyik fontos eszköze a *vékonyfalú rudak* alkalmazása. A közelítő elméletek nagy sokasága létezik, s jellemző a közvetlenül nem elég szigorúan megalapozott, inkább az elmélet egyszerűsítése, s nem annyira a valóság pontosabb leírása kedvéért tett egyszerűsítő feltevések nagy száma és tarkasága. Az ilyen rudakkal kapcsolatos stabilitásvesztés jellegzetessége, hogy az vagy az egész rúdra kiterjedő, általános lehet, vagy viszonylag kis környezetre koncentrálódó, helyi instabilitás, vagy esetleg mindkét fajta egyszerre. A rezgésfeladatok terén a longitudinális, csavaró és hajlító jellegű lengésformák egymással csatolásban való jelentkezése a különlegessége e problématípusnak.

A kutatás egyik legfontosabb eszköze e területen talán az indexes tenzorkalkulus; ez ad lehetőséget egyre pontosabb rúdmodellek dinamikai egyenleteinek adekvát felírására.

3. Javaslat a dinamikai jellegű hazai kutatás főbb irányaira

A hazai adottságokat, szükségleteket, az MSZMP tudománypolitikai irányelveit figyelembe véve elsősorban abba az *általános* kutatási törekvésbe való bekapcsolódást, illetve a már folyó ilyen irányú munkák intenzitásának fokozását javasoljuk, amely finitizálással oldja meg a dinamikai feladatokat.

A *konkrét* kutatási irányokat illetően az 1., 2., 3., 8., 10., 11., 14., 18. számúakba való hazai bekapcsolódást — illetve a meglevő ilyen irányú munkák nagyobb fokú szervezését, intenzitifikálást — tartanánk lehetségesnek és szükségesnek.

Survey of the Research Work on the Dynamics of the Theory of Elasticity in Hungary and in Foreign Countries; Suggestion for Performing such Investigations in Hungary. On the basis of the Hungarian and foreign review literature, reports on results of investigations, symposiums, international documentation on the subject, as well as on personal experiences, author strives to summarize the general trends as well as the actual principal purposes of the researches, detailing them under eighteen items. A proposal is made to mark out the trends of research work and to intensify certain investigations.

Eine Übersicht über die in Ungarn und im Ausland laufende Forschungsarbeit in Bezug der Theorie der dynamischen Probleme der Elastizität; Vorschlag zur Anstellung solcher Untersuchungen in Ungarn. Aufgrund der ungarischen und ausländischen Forschungsarbeit, der Berichte über die Forschungsergebnisse, Symposien, internationalen Bezugsfachzeitschriften und persönlichen Erfahrungen versucht der Verfasser die mit diesem Wissenszweig zusammenhängenden allgemeinen Tendenzen und konkreten Zielsetzungen zusammenzufassen. Es werden die einzelnen Forschungszwecke unter achtzehn Punkten angeführt, und ein Vorschlag sowohl zur Bestimmung der Richtungen solcher Untersuchungen, als auch zur Verstärkung der Intensität einiger schon im Gange befindlichen Forschungen gemacht.

A HŐIONOS GENERÁTOROK

BITÓ JÁNOS*
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK DOKTORA

[Beérkezett, 1972. április 5-én]

A dolgozat bevezető részében a hőionos generátorok előnyös tulajdonságai mellett a szerző ismerteti azok csoportosítási szempontjait, utalva ezzel a hőionos generátorok fontosabb típusaira. Röviden bemutatja a jelenlegi kisszámú kísérleti kipróbálás tapasztalatait, mind a hagyományos hőerőművek, mind pedig az atomerőművek hőionos fejelése terén. A kutatási és fejlesztési munkák állását az ITR rendszerben alkalmazott hőionos generátorok ismertetésével jellemzi, elemezve azok fontosabb paramétereinek — hatásfokának, emitterhőmérsékletének, kimenőteljesítményének, fajlagos tömegének — jellegzetes összefüggéseit. A fontosabb kutatási irányok bemutatására a szokásos felületi és térfogati jelenségek szerinti bontást alkalmazza.

1. Általános megjegyzések

E közvetlen energiaátalakítók alapelve 1915 óta ismert [1]. Az iránt megnyilvánuló érdeklődés az ötvenes években megélénkült. Ennek okai a következők [2]:

- nem rendelkeznek forgó alkatrészekkel,
- nem igényelnek külső mágneses teret,
- viszonylag magas hőmérsékleten működnek,
- kimenőteljesítményre vonatkoztatott fajlagos tömegük és térfogatuk viszonylag kicsiny,
- a radioaktív bomlástermékekre és sugárzásokra csak viszonylag kevéssé érzékenyek,
- egyszerű felépítésűek.

A hőionos generátorokban vagy más néven plazmadiódákban lejátszódó fizikai folyamatokat alapul véve, az elektródok közötti L távolság, az elektronok l közepes szabad úthossza és a D Debye—Hückel-féle leárnyékolási távolság felhasználásával az alábbi öt csoportba sorolhatók:

1. vákuumdiódák, amelyeknél az $L < D$,
2. plazmadiódák, ahol $L \gg D$,
3. kvázivákuum- vagy Knudsen-diódák, ahol $l \gg L$,

* Dr. Bitó János, Budapest XII., Korompai u. 22/a.

4. gázkinetikus diódák, ahol $l \sim L$,
5. diffúziós üzemmódú diódák, ahol $l \ll L$.

E csoportosítás egyben üzemmód szerinti osztályozást is jelent. Korábban felmerült még a mágneses triódák mint közvetlen energiaátalakítók alkalmazhatósága is [3], ezek kutatását azonban az eddigi vizsgálatok negatív eredményei miatt beszüntették. Emiatt a továbbiakban mágneses triódákkal nem foglalkozunk.

Egyes további osztályozások csak vákuumdiódákat és alacsony- vagy nagynyomású, gáz, gőz, gáz—gőz, gáz—gáz és gőz—gőz munkaközegű hőionos generátorokat említenek. [4]. Azokat az átalakítókat nevezik alacsonynyomásúaknak, amelyekben az elektronok térfogati ütközések nélkül jutnak el az emittertől a kollektorig. Nagynyomású esetben a térfogati kölcsönhatások jelentős szerepet játszanak. Az alacsonynyomású átalakítók munkaközegének nyomása $10^{-4} \div 10^{-2}$ torr között van, a nagynyomásúaké pedig általában $1 \div 100$ torr közötti tartományba esik. A 10^{-1} torr bizonyos értelemben átmeneti nyomástartományt jelent; az e nyomáson fellépő fizikai folyamatokról csak nagyon keveset lehetett megtudni. E kritikus nyomástartományban legfeljebb modellkísérleteket folytatnak, főleg alapkutatási jelleggel [2].

Az alkalmazott munkaközeg fajtáját tekintve az alábbi csoportosítás végezhető el:

a) elektrongáz (vákuumdiódák),
b) Cs alapgőzből kialakított plazma, s esetleg néhány elektropozitív vagy elektronegatív gőz-, gázadalék,
c) Xe, Kr, Ne alapgázból és esetleg néhány gőz- vagy gázadalékból létrehozott plazma.

Amennyiben Cs alapgőzt alkalmaznak, gyakran kerül sor Ba, CsF, illetve Kr és Xe adalékok kipróbálására is [4]. A kimenő teljesítmény növelésére végzett kísérleteknél jelentkezett az O_2, F és J, elektronegatív adalékok alkalmazásának előnye [2].

Gáztöltésű átalakítóknál is szokás egy vagy több adalékot kipróbálni, ezekkel a plazmadióda egy-egy jellegzetes paraméterét lehet javítani.

Mindeddig nem született egyértelmű javaslat a hőionos generátorok gőz- illetve gáznyomására, valamint annak összetételére. A legelterjedtebb kísérleti modelleknél Cs gőzt — esetenként F adalékot — valamint Xe alapgázt és Cs adalékot alkalmaznak [5].

Emitteranyagként többnyire W, Mo, Nb, Ta és UC jön számításba, s a kiválasztott emitteranyag kilépési munkájának megfelelően történik a kollektor anyagának megállapítása. Fontos paraméterként kell számításba venni az elektródok várható üzemi hőmérsékletét, amely esetenként még az elektródok közötti távolság nagyságát is befolyásolja [2].

Az elektródok közötti távolság növelése érdekében indultak meg a Xe alkalmazhatóságát vizsgáló kísérletek, amelyek végül is mintegy 60 torr nagyságú Xe parciális nyomás beállítását tették indokolttá. Ez esetben, mintegy további járulékos hatásként, csökken a térfogati rekombináció, mivel a Xe e nyomástartományban csökkenti az ionmozgékonyságot. Ennek következtében csökken a belső, térfogati potenciálesés, s nő a plazmadióda emitterfelületére vonatkoztatott fajlagos kimenőteljesítmény [4].

A hőionos generátorok „csatolási lehetőségeik" szerint is osztályozhatók. Ennek megfelelően három csoportjuk különböztethető meg [11]:

a) a napenergia,
b) a hagyományos tüzelőanyagok,
c) a nukleáris erőművek

által szolgáltatott hőenergia átalakítására szolgáló rendszerek.

Ma is igen fontosnak tartják a napenergia megfelelő módon történő, jobb hatásfokú hasznosítását, hiszen a már feltárt hagyományos tüzelőanyagok összes kalóriaértéke $7 \cdot 10^{18}$ kcal, az atomerőművek üzemanyagtartalékáé $144 \cdot 10^{18}$ kcal. A Nap évente mintegy $1000 \cdot 10^{18}$ kcal hőenergiát szolgáltat Földünknek. Ha csak egy 100 km^2-es földfelszínre jutó napenergiát át lehetne alakítani 20%-os hatásfokkal elektromos energiává, máris fedezni lehetne az emberiség jelenlegi energiafogyasztását. E rendkívül előnyös perspektívák ellenére sem halad megfelelő ütemben a hőionos generátorok napenergiára történő adaptálása, amiben többek között az is közrejátszik, hogy még mindig nem alakult ki a véglegesnek tekinthető alapelképzelés az elfogadható hatásfokú hőionos generátorról és segédberendezéseiről.

Viszonylag előrehaladottabb állapotban vannak a hagyományos tüzelőanyagokkal és a hasadóanyagokkal működtetett erőművek viszonylatában végzett átalakító-kísérletek. Az űrkutatás hatékonyan sürgeti a hőionos generátoroknak a kozmikus térben alkalmazható nukleáris erőműveknél történő felhasználását, éppen ezen átalakítóknak bevezetőben röviden ismertetett előnyei miatt [6, 7].

A hőionos generátorok lehetséges elméleti hatásfoka (Carnot-ciklus) meghaladja a 80%-ot [5]. Jelenleg azonban csak a rendkívül jól sikerült, kis élettartamú, kísérleti mintapéldányoknál sikerült elérni a 20%-ot. A leghaladottabb Cs-gőzös típusok hatásfoka is mindössze $16 \div 18\%$ körül van [6—8].

Perspektivikus kísérletek folynak az emitter hasadóanyaggal való helyettesítésére [2], valamint a váltakozóáramú diódák kialakítására vonatkozóan [5]. Ez utóbbit W. Bloss vetette fel [5, 9]: a Xe alapgázt tartalmazó diódában keresztkisülést javasolt kialakítani. A generátor ily módon transzformálható, pulzáló egyenfeszültséget szolgáltat. A kis fajlagos súlyú umformerek tökélete-

sedése azonban pillanatnyilag háttérbe szorította a ma még több tisztázatlan jelenséggel működő, sok komplikációt adó, pulzáló egyenáramú plazmadiódák fejlesztését.

2. A jelenlegi alkalmazások

Világviszonylatban jelenleg az erőművek 50%-a működik széntüzeléssel, hatásfokuk azonban nem haladja meg a 41%-ot. 1970-ben 62 működő atomerőművet tartottak nyilván, amelyek együttesen, 224 MW átlagos kimenőteljesítmény mellett, 13 914 MW teljesítményt szolgáltattak [10], átlagosan 32%-os hatásfok mellett.

A nemrégiben befejezett felmérések szerint [8] az emberiség energiaigénye 1985-ig a jelenleginek háromszorosára növekszik. Ennek biztosítására újabb erőműveket építenek, növelik a nukleáris erőművek teljesítményét és javítani kívánják az energiaátalakítás hatásfokát.

A rendelkezésünkre álló adatok birtokában várható, hogy 1980-ra már megjelennek a tenyészreaktorok (olyan atomerőművek, amelyek az energiafelszabadításhoz felhasznált hasadóanyagnál nagyobb mennyiségű, másutt felhasználható radioaktív anyagot állítanak elő), s ezek rentábilis teljesítményét legalább 1000 MW-ban, célszerűen 3000 MW-ban jelölik meg. Az eddigi tapasztalatok alapján ezekhez hőionos generátorokat is fognak méretezni. E döntést az eddigiekben szerzett előnyös kutatási és fejlesztési eredmények indokolják.

A plazmadiódák e rendszerekre történő fokozatos adaptálását termionikus vagy hőionos fejelésnek nevezik. Az átalakítókat kivétel nélkül, minden esetben a villamosenergia-termelés elé kapcsolva működtetik, mint arra már korábban is javaslatokat tettek [11]. Bár kétségtelenül előnyös lenne, ha az összes előállított hőenergia az átalakítók blokkján menne keresztül, ezt azonban különböző okok miatt jelenleg még nem tudják biztosítani; a termelt hőenergia egy részét vezetik csak át a diódákon.

A jelenleg alkalmazott hőionos generátorok kivétel nélkül Cs gőzzel dolgoznak — esetenként Xe adalékot is tartalmaznak —, s szinte kivétel nélkül a nagynyomású tartományban [6, 8, 12—14].

2.1. *Hőionos fejelés széntüzeléses erőműveknél*

A hőionos generátorok ilyen jellegű adaptálását az elsők között kezdte meg az angliai CEGB (Central Electricity Generating Board) [8, 11], azonban a hatvanas évek közepén e kutatásokat, az MHD rendszereket előtérbe helyezve, másodrendűvé tették, azok menetét jelentékenyen lelassították.

Az Amerikai Egyesült Államokban az angliai intézetekkel egyidőben kezdődött meg a hőionos generátorok alkalmazhatóságának vizsgálata és e rendszerek fejlesztése. A munkák eredményeként több amerikai szerv közös

támogatásával 1969 végén kezdték meg a Bull Run erőmű hőionos megfejelését. Az erőmű eredetileg 914 MW teljesítményt szolgáltatott, amelyet Cs-diódás kicsatolással, s a hűtőrendszer hőmérsékletének megemelésével 225 MW-tal sikerült növelni. Az erőműben ezzel egyidőben szükségszerűen végrehajtott átalakítások következtében az üzemanyagfogyasztás közel 2%-kal megemelkedett [8].

Az átalakításhoz 15%-os hatásfokú, wolfram emitteres plazmadiódákat használtak fel. Az emitterfelületet viszonylag nagyra méretezték, szilíciumkarbid védőbevonattal látták el. A diódák összekapcsolásával modulokat alakítottak ki; egy modul 25 diódát tartalmaz, s 0,7 V feszültség mellett 1140 A egyenáramot szolgáltat.

Az így előállított, kis feszültségű, nagy áramú teljesítménnyel egyenáramú motort hajtanak meg, amely közvetlenül egy generátor tengelyére csatlakozik. E motorok sorozatgyártását a General Electric cég már meg is kezdte, így azok 1971-ben már kereskedelmi forgalomban is kaphatók voltak. Fajlagos költségük: 6 dollár/kW. A sorozatgyártást megelőzően végzett felmérések szerint ez a megoldás jóval gazdaságosabb (egy bizonyos teljesítmény felett), mint a félvezetős átalakítás [8].

Amennyiben előkapcsolt hőionos fejelést alkalmaznak, a Bull Run esetében, a várt, éves szintű tüzelőanyag-megtakarítás mintegy 3 millió dollárt tesz ki.

Még 1971-ben megkezdték annak az amerikai erőműnek az építését, amelynél a hőionos generátorokat a kazán falába építik be. Az előzetes számítások szerint ezen az úton oly mértékű megtakarítás érhető el, amely hozzávetőlegesen a teljes erőmű beruházási költségének 8%-át teszi ki [8].

Az eddigi tapasztalatok arra mutatnak, hogy a széntüzeléses erőműveknél alkalmazott hőionos fejelés segítségével az erőművek hatásfoka 51%-ra javítható [8].

2.2. *Hőionos fejelés atomerőműveknél*

A jelenleg alkalmazott atomerőművek többsége könnyűvizes hűtésű (forróvizes vagy nyomottvizes kivitelben), s csak viszonylag kisszámú folyékony fémes (Na, K, Li) hűtésű üzemeltetéséről tudunk. Ezeknél a könnyűvizes rendszereknél végezték el a hőionos fejelés lehetőségének elemzését, s megállapították a fejelés két módját:

a) a reaktor magján kívüli,

b) a reaktor magján belüli

átalakító-elhelyezéssel. Részben az 1. pontban felsorolt alkalmazási előnyök, részben pedig gazdaságossági megfontolások miatt ma már szinte kivétel nélkül a második megoldást alkalmazzák, illetve vizsgálják. A hőionos generátor magon belüli elhelyezésére ismét két lehetőség kínálkozik:

a) a hasadóanyagnak mint emitternek az alkalmazása,

b) a hasadóanyag más jellegű, diódában való elhelyezése, pl. mint tartórúd, emitter hornyaiban mint fűtőanyag stb.

Az eddigi gyakorlati alkalmazásoknál kivétel nélkül a második lehetőség-csoporttal élnek; az átalakítókat többnyire ráhúzzák a hasadóanyag-rudakra, s az azokból felszabaduló energia ezáltal maradéktalanul áthalad a diódákon, s a hűtőrendszer az ezektől leadott hőt veszi fel.

Mindeddig nem adtak ki végleges értékelést e módszer alkalmazhatóságáról és előnyeiről. Nem közölték a fontosabb műszaki részleteket, s nem adták meg a vonatkozó kutatási programok egyes konkrétabb célkitűzéseit sem. Egyedül egy 450 MW teljesítményű forróvizes erőmű átalakítására vonatkozóan vannak valamelyest részletesebb információink [8]. Ennél az átalakításnál lényegében ugyanazokat a Cs gőz diódákat tartalmazó modulokat alkalmazták, amelyek a 2.1. pontban röviden utalt fosszilis tüzelőanyagú erőművek átalakításánál is szerepeltek. A hőionos fejeléssel az atomerőmű eredetileg 32%-os hatásfokát 45,5%-ra emelték, s ennek megfelelően a 450 MW kimenőteljesítmény 832 MW-ra növekedett [8].

Az említett, modulos felépítésű diódarendszer alkalmazásával — a számítások szerint — a nukleáris erőművek energiaköltsége a jelenleginek kétharmadára lesz csökkenthető. Ezzel egyidőben az Amerikai Egyesült Államokban, a hőionos fejelést alkalmazva további átalakításokat végeznek, amelyektől az eddigi kísérletek alapján, a jelenlegi átlagosan 32%-os hatásfok legalább 45%-ra való megnövekedését várják.

Úgy tűnik, hogy az eddigi kísérletek sikerei amerikai viszonylatban ráirányították a figyelmet a hőionos generátorokra, s már 1971-ben több, üzemszerű, tartampróbás ellenőrzést végeztek. Az eddig alkalmazott hőionos generátorok élettartamáról megbízható adatok nem állnak rendelkezésre. A jelenlegi élettartam — egyes utalások szerint — 8000 és 15 000 óra között mozog, az üzemeltetési körülmények és a konstrukció függvényeként [15—17].

3. Fejlesztési eredmények

A fejlesztés jelenlegi irányvonalai a következők [15—20]: a 16÷18%-os átalakítási hatásfok elérése az 50÷100 kg/kW fajlagos tömegű, 100÷150 kW kimenőteljesítményt szolgáltató, 10 000÷15 000 óra átlagos élettartamú hőionos generátoroknál. E célkitűzések megvalósítására szinte kivétel nélkül a nagynyomású Cs gőz munkaközegű — esetleg Xe, Ba vagy CsF adalékot is tartalmazó —, W vagy Mo emitteres plazmadiódákat tartják alkalmasnak.

Az irodalomban részletesebben ismertetett fejlesztési munkák kivétel nélkül űrkutatási támogatással folynak, s ennek megfelelően a kis fajlagos tömegű atomerőművek hőionos generátorokkal történő fejelésére vonatkoz-

nak. Ezek közül is kiemelkedik az ITR — Incore Thermionic Reactor — program, amely kifejezetten a reaktormagon belül elhelyezett, hasadóanyagot tartalmazó plazmadiódák tökéletesítésével foglalkozik.

E kutatási-fejlesztési tevékenység viszonylag komoly ráfordítással folyik a Szovjetunióban, az Amerikai Egyesült Államokban és az NSZK-ban. Az egyes programok közötti eltérés főleg az alkalmazott reaktor jellegében jelentkezik; általában Cs gőz munkaközegű, nagynyomású plazmadiódát alkalmaznak, W emitterrel és Mo kollektorral. Kisebb eltérések mutatkoznak az egyes vizsgált átalakítók között, a gőz- és gáz-adalékok, elektródbevonatok és a geometriai méretek vonatkozásában.

A Szovjetunióban UO_2 üzemanyagú, fémhidrid moderátorú, Na, K vagy Li hűtőközegű reaktorok esetében vizsgálják az ITR rendszerű, hőionos átalakítást [6].

Az Amerikai Egyesült Államokban a fejlesztési munkák két nagyobb vállalatnál összpontosulnak: a Gulf General Atomics és a General Electric cégnél. E kettősségnek megfelelően UC, illetve UO_2 hasadóanyagra épített gyorsreaktorokkal kísérleteznek [6].

Az NSZK-ban a Siemens cég a BBC egyes részlegeivel együttműködve 1963 óta foglalkozik az ITR technika tökéletesítésével [13, 14, 21, 22]. Hasadóanyagként erősen feldúsított, 93%-os U_{235} és cirkonhidrid keveréket alkalmaznak, moderátorként valamely fémhidrid, hűtőközegként pedig folyékony nátrium szolgál [13]. Maga a reaktor kis súlyú, kétzónás, berillium reflektoros teljesítményreaktor, magja 450 mm magas, és 350 mm átmérőjű. Az ezzel végzett hőionos fejelés eredményei pillanatnyilag a legperspektivikusabbak; nemzetközi viszonylatban a Siemens által kifejlesztendő megoldás áll legközelebb a megvalósuláshoz. Ennek megfelelően az itt alkalmazott hőionos átalakító jellemzésén keresztül mutatjuk be a nemzetközi fejlesztési szintet.

3.1. *A plazmadiódák felépítése*

A diódák hengeres alakúak, s lényegében három, egymásra húzható részből tevődnek össze: az emitterből, amelynek furatába vagy furataiba a hasadóanyag kerül, az emitterre ráhúzható, hengerpalástszerű kollektorból és a kollektor ugyancsak hengerpalástszerű külső burkolatából.

3.1.1. *Az emitter.* Molibdénből készített, 54 mm hosszú, 20 mm legnagyobb átmérőjű elem, amely legalább egy, de legfeljebb 11 hosszanti furattal van ellátva. E furatok közül néhányba hasadóanyagot helyeznek el. Általában a központi, nagyobb átmérőjű furat egy tartórúd számára készül, s az ezt körülvevő 10 darab, 3,3 mm átmérőjű kisebb furatban helyezik el a mintegy 46 gr urándioxidot. Ez fűt egy diódát. Az emissziós felületre orientált kristályokból álló W bevonatot párologtatnak fel. A radioaktív bomlás során fel-

szabaduló hasadóanyagok — gázok — eltávolítására külön furatokat alakítanak ki.

3.1.2. *A kollektor és védőköpenye.* A kollektor, alakját tekintve egy az emitterrel azonos magasságú hengerpalást. Anyaga yttriummal ötvözött molibdén. Külső felületére plazmaszórással, sorrendben réz, nikkel-króm, alumíniumoxid és réz bevonatokat visznek fel, vékony rétegek formájában. A folyékony nátrium hűtőközeg elleni védelmet egy, a kollektorra ráhúzott, hengerpalástszerű védőköpennyel biztosítják, amelynek anyaga 1% cirkont tartalmazó nióbium.

3.1.3. *A munkatér.* Az emitter-kollektor távolság többnyire 0,15 mm, esetenként azonban — például Xe adalékgáz alkalmazásakor — 0,17 mm is lehet. A munkaközeg nagynyomású Cs gőz, az alkalmazott nyomás nagysága 70 torr. Minden egyes dióda munkaterét egy közös, termosztált Cs-tartállyal kötik össze. Az összekötő vezetékek — az áramkivezetőkkel együtt — a hasadóanyagok eltávolítására szolgáló csövek mellett futnak, az emitter-testben.

A kísérletek jelenlegi fázisában 7, egymással sorba kötött plazmadiódát helyeznek el, egy-egy, a reaktor magjában elhelyezett tartórúdra húzva. A tartórúd az emitter központi furatában foglal helyet, a plazmadióda tengelyében. A pillanatnyilag fejlesztés alatt álló ITR modell 19 ilyen átalakító oszlopot tartalmaz, hexagonális elrendezésben. Az oszlop tartórúdjaként yttriumhidroxid szolgál. A hasadóanyag az emitter 10 furatába kerül. A hetesével összekapcsolt átalakítók — tehát az egy yttriumhidroxid tartórúdon kialakított átalakító oszlop — mintegy 200÷300 A erősségű egyenáramot szolgáltatnak, 4÷5 V feszültség mellett, üzemi körülmények között.

Ezek az átalakítók képezik a reaktor belső magját, s e körül helyezik el a 400 darab, 14 mm átmérőjű, erősen feldúsított U_{235} izotópot tartalmazó üzemanyagot és a 19 moderátor rudat. Mindkét magrészt nátrium áramoltatásával hűtik.

Az egyes hőionos generátorok jelenlegi hatásfoka 15% [6]. Az itt ismertetett dióda-felépítés azonban még nem végleges. A fent bemutatott ITR elrendezés mellett 1971 végére a 20 kW-os, a hetvenes évek végére pedig a 200 kW-os kimenőteljesítmény elérését tűzték ki célul. A 20 kW-os teljesítményű egység üzemi kipróbálását 1971 végén tervezték elvégezni, s jülichi Kernforschungsanstalt egyik telepén [6].

A Gulf General Atomics kutató intézetében végzett hasonló kísérletek az itt bemutatottal közel azonos felépítésű plazmadiódák esetén 15 000 órás átlagos élettartamot eredményeztek [15]. Az NSZK-ban végzett élettartamvizsgálatok eredményei ettől elmaradnak: az elektromos fűtéssel végzett élettartamvizsgálatok során ugyan több mint 14 000 órás átlagélettartamokat kaptak, azonban reaktorhővel történő fűtésnél, ITR rendszerben csak 3750 órás működést sikerült biztosítani [16]. A számottevő élettartamkülönbséget a reaktor bomlástermékei által kiváltott hatásnak tudják be, mivel mindkét

esetben ugyanazt az itt ismertetett, 0,17 mm elektródtávolságú diódát alkalmazták, s az elektródok hőmérsékletét is közel azonosra állították be. Az emitter hőmérséklete 1866 K° volt.

Az élettartamvizsgálatok mellett kísérleteket végeztek a fent röviden bemutatott plazmadiódákkal, azok hatásfoka, be- és kimenőteljesítménye, emitterhőmérséklete, fajlagos tömege és ITR rendszerben alkalmazott száma közötti összefüggések meghatározására. A vizsgálatoknál minden esetben az ITR rendszerben levő átalakítók komplexumának jellemzésére törekedtek. A plazmadiódák egyedi viselkedésére nem közöltek adatokat [6].

3.2. *Hatásfok — emitterhőmérséklet*

A most következő adatok arra az esetre vonatkoznak, amikor a reaktor magjában 19 darab, egyenként 7 sorbakötött plazmadiódát tartalmazó átalakító oszlopot helyeznek el, hexagonális elrendezésben.

I. táblázat

Emitter-hőmérséklet (K°)	Termikus bemenő teljesítmény (kW)	Kimenő el.-os teljesítmény (kW)	Hatásfok (%)
1673	130	8	6
1673	200	12	6
1770	170	13	8
1770	270	22	8
1770	330	20	6
1866	410	24	6
1866	370	29	8
1866	310	31	10
1962	450	37	8
1962	400	40	10
1962	320	38	12
1962	250	30	12
2057	200	20	10
2057	250	30	12
2057	440	53	12
2057	500	50	10
2153	255	32	12
2153	300	42	14
2153	450	64	14

Az I. táblázatban bemutatott négy változó közötti kapcsolat paraméteres formában ábrázolva szemléletesen mutatja a jelleggörbék menetét. A függvények alakja hurokszerű, az összefüggéseket ugyanis erősen befolyásolja a plazmadióda áram-feszültség karakterisztikája.

Az I. táblázatban bemutatott adatok egy nagyobb rendszerét statisztikusan elemezve megállapították, hogy az adott esetben, a kimenő teljesítmény

megkétszerezése a termikus bemenő teljesítmény másfélszeres növelésével elérhető [6].

3.3. *Fajlagos tömeg — kimenő teljesítmény — emitterhőmérséklet*

Az ITR rendszerben készített, 19 átalakító oszlopot tartalmazó, 20 kW kimenőteljesítményt szolgátató laboratóriumi mintapéldány reaktorának tömege, a beleépített hőionos generátorokkal együtt 500 kg, az árnyékolás 200 kg, az alkalmazott radiátor fajlagos tömege pedig további 60 kg/kW. A II. táblázatban szereplő számítása ezen a módon történt.

II. táblázat

Emitter-hőmérséklet (K°)	Kimenő teljesítmény (kW)	Fajlagos tömeg (kg/kW)
1673	10	130
1673	10	100
1770	15	95
1770	20	60
1866	25	65
1866	25	45
1962	35	50
1962	35	37
2057	45	40
2057	45	30
2057	52	30
2153	60	32
2153	45	30
2153	65	30

A II. táblázatban bemutatott adatok közötti összefüggéseket is hurokgörbék jellemzik. Ezek paraméteres ábrázolásával azonban világosan látható az a tendencia, hogy minél nagyobb az emitterhőmérséklet, s ennek megfelelően minél nagyobb a kimenő teljesítmény, annál kisebb a rendszer fajlagos tömege [6]. Ha csak ezt kellene figyelembe venni, igen magas emitterhőmérsékletek kialakítása látszana célszerűnek, ezzel azonban oly mértékben megnövekedne az elektródok porlódása, hogy amiatt az átalakítók élettartama exponenciálisan csökkenne (emitterhőmérséklet függvényében véve). E megfontolások alapján választották ki a Siemens kutatói az 1886 K°-os hőmérsékletet, a közeli célkitűzésükben szereplő, 20 kW-os ITR rendszer átalakítóinak emitterhőmérsékleteként.

Összehasonlításként megjegyezzük, hogy a General Electric által készített SNAP-10A jelzésű, hővillamos átalakítóval ellátott, ugyancsak űrkutatási célokra készített nukleáris energiaforrás fajlagos tömege 800 kg/kW [23], azaz sokkal nagyobb, mint bármelyik megvalósulás előtt álló ITR egy-

ségé. A SNAP-10A jellemzői: kimenő teljesítménye 0,55 kW, a reaktor tömege 125 kg, az árnyékolás 100 kg, a radiátor a pumpával és a hővillamos átalakítóval 150 kg, a hőárnyékolás pedig 65 kg. Hasadóanyaga erősen feldúsított U_{235}, amely 40 kW termikus teljesítményt szolgáltat. Hővillamos átalakítórendszere Ge—Si diódákra épül, 120 darab 24 elemes egységet tartalmaz, s a 0,55 kW kimenő teljesítményt 30 V-on szolgáltatja. Kozmikus környezetben — feltehetően áramköri hiba miatt — 1000 órát, a földi szimulációs kísérletek során pedig több mint 10 000 órát üzemelt [23].

3.4. *Fajlagos tömeg — kimenő teljesítmény — átalakító rudak száma*

A kimenő teljesítmény növelésének egyik lehetősége a reaktorba beépített plazmadiódák számának növelése. A III. táblázatban a 19; 37 és 61, egyenként 7 plazmadiódát tartalmazó átalakító rúd reaktorba való beépítésekor kísérletileg nyert adatokat mutatjuk be.

III. táblázat

Átalakító oszlopok száma (db)	Kimenő teljesítmény (kW)	Fajlagos tömeg (kg/kW)
19	10	100
19	20	70
19	30	50
19	40	40
37	40	40
37	50	37
37	60	30
37	70	27
61	70	34
61	80	30
61	90	28
61	100	25
61	110	23
61	120	22

A III. táblázat adataiból kitűnik, hogy minden kimenőteljesítménytartományban, a fajlagos tömeg csökkentését szem előtt tartva kijelölhető a célszerűen alkalmazandó plazmadiódák száma. Ez egyben lehetőséget kínál az emitterhőmérséklet csökkentésére és ezzel a plazmadióda élettartamának növelésére is.

A 40 kW kimenő teljesítménynél, a 40 kg/kW fajlagos tömeg akár 19, akár pedig 37 átalakító oszlop alkalmazásával elérhető. A különbség azonban igen lényeges: az első esetben az emitter hőmérséklete 2000 k°, a másodikban pedig csak 1800 K°. Az itt jelentkező 200 fokos emitter-hőmérsékletkülönbség legalább 3000 órás élettartamkülönbséggel egyenértékű.

Mindezt figyelembe véve célszerűnek látszik a reaktormagban elhelyezett plazmadiódák számát — adott esetben a kimenő teljesítmény fokozását is szem előtt tartva — legalább 61-re növelni. Ennek azonban pillanatnyilag konstrukciós és technikai akadályai vannak. Ezért is maradtak első lépésként a kisebb kimenő teljesítményű ITR rendszer kifejlesztésénél, amely egyben tapasztalatszerzésként is szolgál a továbblépés megtételére vonatkozóan [6].

4. Kutatási irányok

A kutatómunkák szinte kivétel nélkül az alacsony- és nagynyomású, gőz vagy gáz munkaközeget tartalmazó plazmadiódákra korlátozódnak. A központi irányvonal a nagynyomású Cs-gőzös plazmadiódák hatásfokának javítása, a megfelelő adalékgőzök és -gázok kiválasztása, alkalmas elektródanyagok vagy felületi bevonatok keresése [24—32]. Még alapkutatási szinten is csak elvétve foglalkoznak a vákuumdiódákkal. A mágneses triódák kutatását leállították.

4.1. *Felületi jelenségek*

Változatlanul vizsgálják a Taylor—Langmuir-effektust [24], azaz az emitterfelületre rácsapódó Cs-film kilépési munkát és emitter-párolgást csökkentő hatását. Az eddigi vizsgálatok eredményei egyértelműen azt mutatják, hogy a Cs gőznyomásának alkalmas megválasztásával és például Xe adalékgáz alkalmazásával a W emitterek párolgási sebessége 1 ÷ 1,5 nagyságrenddel csökkenthető [25].

Több helyen elemzik az emitter és a kollektor felületének megfelelő kilépési munkájú réteggel történő fedését [2, 26—29], s a legcélszerűbbnek látszó kompromisszumos megoldás kiválasztását. Elektródanyagként, illetve fedőrétegként ma is Nb, Mo, W, Re, UC és Ta jön számításba. Ezeknél a szokásos katódi diagnosztikát [30] alkalmazva folynak a kutatások, a különböző körülmények között végzett élettartamvizsgálatokkal egybekötve (pl. radioaktív és hasadóanyagok hatásának kitéve).

A falakon végbemenő mikrofizikai folyamatokat mint kölcsönhatási jelenséget tanulmányozzák, de ezen túlmenően vizsgálatok folynak a falak anyagának célszerű megválasztására vonatkozóan is.

4.2. *Térfogati jelenségek*

A komplexebb kisülésfizikai vizsgálatok körébe beletartoznak mindazon kölcsönhatási jelenségek, amelyek az elektródok vagy a falak mentén, mint plazma—szilárdtest kölcsönhatás alakulnak ki. A viszonylag kis térfogatú

plazma vizsgálatánál a plazmafizika mindkét alapmódszerét (független részecskés és statisztikus leírás) alkalmazzák.

A plazmadiódák jellegzetes mikrojelenségei még ma sem ismeretesek a kívánt részletességgel. Éppen ezért igen előremutatóak azok az elemzések, amelyek során megállapították, hogy a nagynyomású Cs-gőzös plazmadiódák áram—feszültség karakterisztikájának kilenc, jellegét tekintve egymástól eltérő szakasza van. Az ezek közötti eltérések igen jól értelmezhetők a $p \cdot d$ (gőznyomás $\times$ elektródtávolság) szorzat és az emitterfelületi iongeneráció függvényében. E vizsgálatok a munkapont helyes kiválasztásához elengedhetetlen fontosságúak [31].

A diódák feszültség—áram karakterisztikája egyébként esetenként lehetőséget nyújt a térfogati ütközések hatáskeresztmetszetének közvetett meghatározására is [32]. Az Ar, Kr és Ke alapgáz alkalmazásakor negatív karakterisztikájú diódák állíthatók elő, amelyek igen érdekes térfogati jelenségekkel jellemezhetők (Ramsauer-minimum és következményei). Ezek vizsgálatát radioaktív besugárzás alkalmazásával is végzik [33].

A várható felhasználási terület miatt (az ITR rendszerrel elért eredmények) nagy érdeklődés kíséri azokat a kutatásokat, amelyeknél munkaközegként vagy adalékgázként radioaktív, béta-aktív Kr_{85} gáztöltést alkalmaznak [34]. Amennyiben a Kr_{85} mint alapgáz szerepel, akkor a kísérleteket a 20 ÷ 340 torr nyomástartományra terjesztik ki. Hasonló vizsgálatokat végeznek gamma-sugarak és 1 MeV energiájú elektronok besugárzásának hatását figyelve ($3 \cdot 10^8$ rad/óra), az 1 ÷ 600 torr nyomástartományban, Ar, Kr és Xe (mind Ramsauer-minimumos gázok), illetve ezek megfelelő keverékeinek alkalmazásával [35].

4.3. *Hatásfok elemzések*

E vizsgálatoknál a kísérleti módszerekkel meghatározott paraméterekre épített modellekből indulnak ki [36—38]. Az alkalmazott munkaközeg üzemi körülmények közötti viselkedését, valamint az elektród és fali felületi jelenségeket figyelembe véve történnek a számítások. Ezek egyrészt a már fejlesztési szinten kidolgozott kísérleti egységek tökéletesítési irányainak körvonalazására, másrészt a közeljövőben reálisan elérhető hatásfokok előrejelzésére szolgálnak [37, 38].

5. Perspektívák, hazai javaslatok

Az eddig közölt kutatási eredmények alapján nem várható, hogy a hőionos generátorok hatásfoka öt éven belül meghaladja a 20%-ot. A kísérleti jellegű alkalmazások során elért eredmények azonban indokolttá teszik a kutatások továbbvitelét.

A közeljövőben kifejlesztendő plazmadiódák — éppen a kutatási háttér miatt — elsősorban az űrkutatási és földi nukleáris erőművek hatásfokának javítását fogják szolgálni. Bár hagyományos tüzelőanyagokkal működő erőművek hőionos fejelésére is folynak kísérletek, az erre fordított kapacitás viszonylag kicsiny.

Az előzőek figyelembevételével, s abból kiindulva, hogy hazánkban jelenleg e téren nem folyik kutatómunka, meg kell fontolni egy esetleges szinttartó, fogadóképesség biztosítására alkalmas, alkalmazott kutatás beindítását. Ez természeténél fogva inkább elméleti jellegű lenne, bizonyos egyszerűbb kísérleti megoldások, modellek kivitelezése és vizsgálata mellett. Modellként a Cs-gőzös, nagynyomású plazmadiódák valamelyik változata jöhetne számításba, W—Mo emitter—kollektor rendszert alkalmazva.

A kutatás kiterjedhetne az alábbi témakörök valamelyikének vizsgálatára: a kollektor kilépési munkájának csökkentési módjai, a Taylor—Langmuir effektus, a sugárzásos folyamatok (felületi és térfogati) vizsgálata, a térfogati jelenségek elméleti elemzése, modellkialakítás.

Amennyiben e kutatás beindítására sor kerülne, megítélésünk szerint annak legfeljebb 1000÷1500 kutatóóra/év kapacitással kellene folynia. Az esetleges anyagi ráfordítást a kitűzendő feladatok fogják megszabni.

IRODALOM

1. SCHLICHTER, W.: *Ann. Phys.*, 4. Folge. **47** (1915) 573.
2. SZTAHANOV, I. P. és társai: Plazmennoje tyermoemisszionnoje preobrazoványije energii. Atomizdaty. Moszkva, 1968.
3. JENNY, E.: *Schweizerische Bauzeitung.* **19** (1968), 363.
4. SUTTON, G. W.: Direct Energy Conversion. McGraw-Hill Book Company. New York 1966.
5. KLUGE, W.: *VDI-Zeitschrift*, **107** (1965), 205.
6. BUDNICK, D.: *Siemens Zeitschrift*, **44** (1970), 483.
7. LÖB, H.: Nuclear Engineering for Satellites and Rockets. Verlag Karl Thiemig. München 1970.
8. ENGDAHL, L.—CASSANO, F.: *Combustion*, **3** (1970), 24.
9. BLOSS, W.: *Z. angew. Phys.*, **14** (1962).
10. WIESENACH, G.: *VDI Zeitschrift für die gesamte Technik* **112**, (1970), 159.
11. LUKÁCS L.—SZENDY K.—RÉDEY L.—HALÁSZ D.: Villamosenergia közvetlen termelésének új eljárásai. OMFB tanulmány. 1—509—ET. 1965.
12. ANDRAE, H. és társai: *Contributions of 2nd Internat. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation.* Stresa 1968.
13. EINFELD, K.: Előadás, DGRR/WGLR-Jahrestagung. Bad Godesburg 1966. Előadásszám: 66—095.
14. PURSCHEK, R. és társai: Előadás, DGLR Symposium „Energieversorgung im Weltraum. München 1968. Előadásszám: 68—007.
15. ROUKLOVE, P.: Előadás. *Contributions of 2nd Int. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation.* Stresa 1968.
16. HOLIK, H. és társai: *BBC Nachrichten* **51** (1969), 626.
17. LAWRENCE, J.—WILSON, V. C.: Előadás. Thermionic Conversion Specialists Conference. Houston 1966.
18. RASCH, W. és társai: Előadás. *Proceedings of UN Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space.* Wien 1968.
19. GROSS, F. és társai: *Kerntechnik*, **11** (1969), 381.
20. ANDRAE, H. és társai: *Raumfahrtforschung*, **12** (1968), 207.

21. BUDNICK, D.—OLDAKOP, W.: *Siemens Zeitschrift*, **39** (1965), 526.
22. BÖHM, H. és társai: *Jahresbericht* 1968/69 *der Siemens AG.*
23. DIEKAMP, H. M.: Nuclear Space Power Plants. Atomics International, 1967.
24. TAYLOR, J. B.—LANGMUIR, I.: *Phys. Rev.*, **44** (1933), 423.
25. STRUB, H.: *Lichttechnik*, **16** (1964), 121.
26. PSAROUTAKIS, J.: Thermionic Power Generation. Academic Press. London 1965.
27. PSAROUTAKIS, J.: *AIAA Journal*, **4** (1966), 66.
28. BEKMUHAMBETOV, E. Sz. és társai: *ZsTF*, **36** (1966), 481.
29. BEKMUHAMBETOV, E. Sz. és társai: *ZsTF* **35** (1965), 1809.
30. BITÓ, J.: *Acta Techn. Hung.*, **68** (1970), 225.
31. BULLIS, H. H. és társai: *Journal of Applied Physics*, **38** (1967), 3425.
32. BOHDANSKY, J.—LANGPAPE, R.: Előadás. Ninth Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Contributed Papers. Bukarest 1969.
33. FORMAN, R.: *Phys. Rev.*, **128** (1962), 497.
34. FORMAN, R.—GHORMLEY, J. A.: *Journal of Applied Physics*, **33** (1962), 3057.
35. FORMAN, R. és társai: *Phys. Rev.*, **128** (1962), 1493.
36. HALÁSZ, D., SZENDY, K., *Acta Techn. Hung.*, **48** (1964), 125.
37. SHAKED, H.: *Z. für Naturforschung*, **20a.** (1965), 1588.
38. LEWIS, H. W.—REITZ, J. R.: *Journal of Applied Physics.* **31** (1960), 723.

The Thermionic Generators. In the introductory part of the paper the author discusses the advantageous properties of the thermionic generators and the points of view for their classification, thus pointing out the more important types of these generators. He briefly reviews the experience with the so far only few trials, in heading traditional thermal power stations as well as atomic power stations. The state of R and D is characterized by presenting thermionic generators used in the ITR system, analyzing the characteristic relations between their more important parameters: efficiency, emitter temperature, output power, specific mass. For reviewing the more important research trends classification according to the usual surface and volume phenomena is used.

Die thermionischen Generatoren. Im einleitenden Teil der Arbeit bespricht der Verfasser neben den vorteilhaften Eigenschaften der thermionischen Generatoren die Gesichtspunkte für ihre Klassifizierung, und hiermit weist er auf die wichtigeren Typen der thermionischen Generatoren hin. In Kürze werden die Ergebnisse der wenigen bisherigen versuchsmäßigen Erprobungen, sowohl bei Vorschaltung vor traditionelle Wärmekraftwerke als auch vor Atomkraftwerke, gezeigt. Der Stand von Forschung und Entwicklung wird durch die im ITR-System verwendeten thermionischen Generatoren characterisiert und deren wichtigere Parameter — Wirkungsgrad, Emittertemperatur, Ausgangsleistung, spezifische Masse — werden analysiert. Um die wichtigeren Forschungsarbeiten zu besprechen, wird die übliche Aufteilung nach den Oberflächen- und Volumenerscheinungen angewendet.

JÁRMŰSZERKEZETEK PONTATLAN GYÁRTÁSÁBÓL ÉBREDŐ SZERELÉSI FESZÜLTSÉGEK SZÁMÍTÁSA*

MICHELBERGER PÁL**
A MŰSZAKI TUD. DOKTORA

[Beérkezett 1970. szeptember 10-én]

A jármű-vázszerkezetek szerelési feszültségeinek, illetve előírt igénybevételi szint mellett a megengedhető gyártási pontatlanság mértékének számításához a statikai modell egyszerűsítésével előnyösen használhatók differenciaegyenletek. A megengedhető gyártási résméretre egyszerű zárt képletek vezethetők le. Szabálytalan szerkezeteken, melyeket az egyszerűsített modell már nem helyettesít kielégítő pontossággal. célszerű a kinematikai terheléseket mátrixszámítás segítségével elemezni. Ennél felhasználható a kompatibilitási egyenlet együtthatómátrixának egyébként is rendelkezésre álló inverze. A technológiai utasításban előírandó résméretet (megengedhető gyártási pontatlanságot) ilyenkor egyetlen skaláris egyenlőtlenség (határesetben egyenlőség) helyett mátrixegyenlőtlenségből határozhatjuk meg.

1. Bevezetés

Az 1960-as évek elején gyártott alvázas autóbuszokon sorozatosan jelentkeztek rendszertelen törések és repedések. A részletesebb vizsgálatokból a törések egy része kimutathatóan túlterhelésre volt visszavezethető, nagyobb részük azonban a járműre ható terhelésekkel közvetlenül nem volt magyarázható. A további elemzések kimutatták, hogy ezek a meghibásodások a pontatlan gyártásból az összeszerelés folyamán keletkező igénybevételekkel magyarázhatók. Az adott technológiai feltételek mellett gondatlan összeszerelésnél a jármű statikus terheléséből származó igénybevétellel egyező nagyságrendű szerelési igénybevételek keletkezhetnek. A vizsgálatok során a járművet első lépésben igen egyszerűen modelleztük, amennyiben az alvázat és a felépítményt egyaránt egy-egy állandó merevségű gerendával helyettesítettük, a karosszéria kereszttartóit végtelen merevnek tekintettük, és a kereszttartóosztást egyenletesnek tételeztük fel. Az egyszerű modell lehetővé tette a problémának differenciaegyenletekkel történő számítását, és sikerült egyszerű, zárt képlettel ismert szerelési pontatlanság esetében az igénybevétel-eloszlást meghatározni [1]. Mivel gyártás közben nem lehetséges a pontatlanságok ál-

* A cikk témáját személyes beszélgetés során Dr. SZABÓ János, az MTA levelező tagja vetette fel. A szerző ez úton is köszönetet mond az érdekes probléma felvetéséért és az értékes megjegyzésekért.

** Prof. Dr. Michelberger Pál, Budapest XI., Egri J. u. 19–21.

landó figyelemmel kísérése, célszerűen ezeket a pontatlanságokat valószínűségi változóknak kell tekinteni. Feltételezve, hogy az egyes összeerősítési pontokban mérhető méreteltérések páronként független valószínűségi változók, továbbá feltételezve, hogy külön-külön jó közelítéssel normális eloszlást követnek, a modellre vonatkozó egyszerűsítéseket megtartva, a valószínűségszámítási probléma is differenciaegyenletekkel tárgyalható, és zárt képletből meghatározható az igénybevétel várható értéke és szórása, valamint eloszlásfüggvénye is [2].

Az időközben elvégzett mérések és számítások kimutatták, hogy alvázas autóbuszokon a karosszéria kereszttartói nem tekinthetők végtelen merevnek, hanem rugalmasnak. Ez a körülmény a problémára vonatkozó alapösszefüggéseket azonban nem érintette, mindössze a jelenséget leíró differenciaegyenlet-rendszer másodrendű helyett negyedrendűre adódott, a szerkezet merevségi viszonyainak elemzésével azonban ez a differenciaegyenlet-rendszer is másodrendűre volt visszavezethető [3].

A számításban alkalmazott feltevéseket (páronkénti függetlenség, normális eloszlás) üzemi mérésekkel jó közelítéssel igazoltuk [4], így a gyártó vállalat számára zárt képletet vezettünk le, amellyel a technológusok a megkövetelendő gyártási pontosságot (mérettolerancia-mezőt) — a merevségi adatok ismeretében — számíthatják.

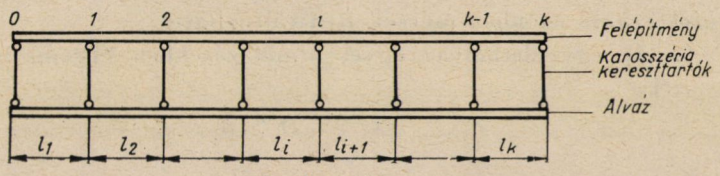
Mind e mellett a modell szabályosságára vonatkozó feltevések nem mindig teljesülnek kellő pontossággal, és így — bár a számítás eredményeit nagyságrendileg ez nem befolyásolja — szükségesnek mutatkozik szabálytalan szerkezet szerelési pontatlanságából származó igénybevételek számításának kidolgozása is.

Az alábbiakban ezért az autóbuszt helyettesítő modellnél megengedjük, hogy az alváz-hossztartó és a karosszéria merevsége azok hossza mentén változzék, a kereszttartók kiosztása ne legyen szükségképpen egyenletes, megengedjük továbbá, hogy az egyes szerkezeti elemek teherbírása azok hossza mentén ugyancsak változó legyen. Továbbra is fenntartjuk azonban a mérési eredményekre építve, hogy a pontatlanságok jó közelítéssel normális eloszlással írhatók le és páronként függetlenek. Az egyes összeerősítési pontokban a pontatlanság eloszlás-függvénye (várható értéke és szórása) természetesen különböző lehet.

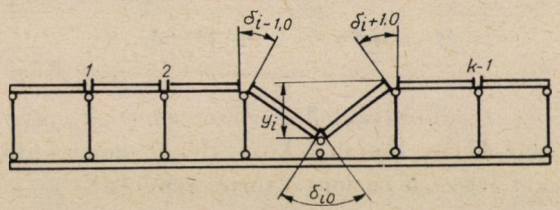
2. Adott méreteltérésű alváz (fenékváz) és felépítmény összeépítése

A teljes járműszerkezetet az 1. ábrán látható egyszerűsített síkbeli modelljével helyettesítjük. Az ábrán az alsó gerenda az alváz (fenékváz) hossztartóját, a felső gerenda pedig a karosszériát helyettesíti, a két gerendát össze-

kötő rudak a karosszéria kereszttartóit jelképezik, melyek alvázas járműn rugalmasnak, fenékvázas járműnél jó közelítéssel merevnek tekinthetők. A feladatot erőmódszerrel oldjuk meg, melyhez a törzstartót a felépítmény megfelelő számú átmetszésével alakítjuk ki. A 2. ábrán az autóbuszt helyettesítő modell törzstartóját tüntettük fel, egyúttal bejelöltük az i-edik kereszttartón mutatkozó, adott y_i méretpontatlanságot, valamint az ebből (. . . $\delta_{i,0}$ . . .)



1. ábra



Határozatlansági fok: $n=k-1$

2. ábra

keletkező mozgásokat is. Az adott méretpontatlanságból keletkező mozgások értéke (feltételezve, hogy y_i, l_i-hez képest kicsiny) a következő:

$$\delta_{i-1,0} = y_i \cdot \left(-\frac{1}{l_i}\right),$$

$$\delta_{i,0} = y_i \left(\frac{1}{l_i} + \frac{1}{l_{i+1}}\right),$$

$$\delta_{i+1,0} = y_i \left(-\frac{1}{l_{i+1}}\right),$$

$$\delta_{j,0} = 0, \text{ ha } j \neq i-1,\ i,\ i+1.$$

Az egyes $\delta_{j,0}$ értékekből képezett oszlopvektort $\mathbf{d}_1$-vel jelölve, a kompatibilitási feltételeket leíró egyenlet

$$\mathbf{D}\mathbf{x}_1 + \mathbf{d}_1 = \mathbf{0}, \tag{1}$$

ahol

$$\mathbf{D} = \int \mathbf{m}\mathbf{m}^* \frac{ds}{JE}$$

Ebben a kifejezésben **m** az egyes átmetszésekben működő egységnyi terhelésparokból keletkező igénybevételek (hajlítónyomatékok) oszlopvektora, természetesen a tartó ívhosszának, *s*-nek a függvénye. Amennyiben a deformációk számításakor a hajlítónyomatékon kívül más belső erők (derék- és nyíróerők, csavarónyomatékok) hatását is figyelembe kell venni, a **D** mátrix értelemszerűen módosítandó. A módosítás a mátrix jellegét (szalagszerű felépítés) nem érinti, az egyes egységtényezők értéke, és az egy sorban szereplő egységtényezők száma azonban mérsékelten változhatik.

Az (1) egyenletből az egyes átmetszésekben ébredő ismeretlen belső erők értéke

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{D}^{-1} \cdot \mathbf{d}_1,$$

és a tartószerkezet igénybevétele

$$M = \mathbf{m}^* \mathbf{x}_1 = \mathbf{m}^* \mathbf{D}^{-1} \mathbf{d}_1. \tag{2}$$

Ha pl. mérési eredményekből sorban adott $y_0, y_1, y_2, \ldots, y_i, \ldots, y_k$ értéke, akkor ezekből $\mathbf{d}_2$ egy lépésben közvetlenül számítható. A számításhoz az egyes y_i értékeket célszerű oszlopvektorba rendezni.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix}.$$

A tartó geometriai adataival pedig célszerű **L** téglalap-mátrixot felépíteni. (A mátrix szalag struktúrájú, soronként 3 zérustól különböző elemmel.)

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{l_1}\right) & \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2}\right) & \left(\frac{1}{l_2}\right) & 0 \ldots & \ldots 0 \\ 0 \ldots & \left(-\frac{1}{l_2}\right) & \left(\frac{1}{l_2} + \frac{1}{l_3}\right) & \left(-\frac{1}{l_3}\right) & 0 \ldots \quad \ldots 0 \\ & & \vdots & & \\ 0 \ldots \quad \ldots 0 & \left(\frac{1}{l_{i-1}}\right) & \left(\frac{1}{l_{i-1}} + \frac{1}{l_i}\right) & \left(-\frac{1}{l_i}\right) & \ldots 0 \\ & & \vdots & & \\ 0 \ldots & \ldots 0 & \left(\frac{1}{l_{k-1}}\right) & \left(\frac{1}{l_{k-1}} + \frac{1}{l_k}\right) & \left(-\frac{1}{l_k}\right) \end{bmatrix}.$$

L és y segítségével a méretpontatlanságból származó (kinematikai terhelésből adódó) terhelési tényezők oszlopvektora:

$$\mathbf{d}_2 = \mathbf{L}\mathbf{y}. \tag{3}$$

A tartószerkezet igénybevétele pedig értelemszerűen a

$$\mathbf{D}\mathbf{x}_2 + \mathbf{d}_2 = \mathbf{0} \tag{4}$$

egyenletből számítva

$$M = \mathbf{m}^* \mathbf{x}_2 = -\mathbf{m}^* \mathbf{D}^{-1} \mathbf{d}_2. \tag{5}$$

Könnyen belátható, hogy ha $y_0 = y_1 = y_2 = \ldots = y_i = \ldots y_k =$ konstans, akkor $\delta_{i,0} \equiv 0$ és M (konstans) $= 0$ vagyis kinematikai terhelés nem adódik.

3. Adott eloszlású méretpontatlanság hatása

Ha y_i valószínűségi változó és eloszlása normálisnak tekinthető, akkor az egyes összeszerelési pontokban a méretpontatlanság várható értéke ($\bar{y}_0, \bar{y}_1, \bar{y}_2, \ldots, \bar{y}_i, \ldots, \bar{y}_k$)-kal jelölhető, a szórás mértéke pedig legyen

$$\tilde{y}_0, \tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \ldots, \tilde{y}_i, \ldots, \tilde{y}_k.$$

A méretpontatlanság várható értékéből a kinematikai terhelésekből származó egységtényezők oszlopvektora a (3) képlet értelemszerű használatával számítható, vagyis

$$\bar{\mathbf{d}} = \mathbf{L} \cdot \bar{\mathbf{y}}. \tag{6}$$

A méretpontatlanságok várható értékéből számított igénybevétel teljesen hasonlóan adódik az adott (fix) méretpontatlanságból számított igénybevételhez (5), vagyis

$$\mathbf{D}\bar{\mathbf{x}} + \bar{\mathbf{d}} = \mathbf{0}, \tag{7}$$

és ebből

$$\bar{\mathbf{x}} = -\mathbf{D}^{-1} \bar{\mathbf{d}}, \tag{7a}$$

továbbá a tartószerkezet igénybevételének várható értéke

$$\bar{M}(s) = -\mathbf{m}^* \mathbf{D}^{-1} \bar{\mathbf{d}}. \tag{8}$$

Az egyes méretpontatlanságok szórásából felépíthető a szórások kinematikai terheléséhez tartozó terhelési tényezők $\widetilde{\mathbf{D}}$ téglalapmátrixa:

$$\widetilde{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} \delta_{1,0}(\tilde{y}_0) & \delta_{1,0}(\tilde{y}_1) \dots \delta_{1,0}(\tilde{y}_k) \\ \delta_{2,0}(\tilde{y}_0) & \delta_{2,0}(\tilde{y}_1) \dots \delta_{2,0}(\tilde{y}_k) \\ \vdots & \\ \delta_{n,0}(\tilde{y}_0) & \delta_{n,0}(\tilde{y}_1) \dots \delta_{n,0}(\tilde{y}_k) \end{bmatrix}$$

Ez a pontatlanságok szórásából képzett téglalapmátrix az előzőkben már bevezetett geometriai méreteket tartalmazó $\mathbf{L}$ téglalapmátrix és az $\tilde{y}_i$ szórásértékekkel felépített $\widetilde{\mathbf{Y}}$ diagonális mátrix szorzatával állítható elő:

$$\widetilde{\mathbf{D}} = \mathbf{L}\widetilde{\mathbf{Y}}, \tag{9}$$

ahol

$$\widetilde{\mathbf{Y}} = \langle \tilde{y}_0, \tilde{y}_1, \dots \tilde{y}_i, \dots, \tilde{y}_k \rangle .$$

Az egyes méretpontatlanságok szórásaihoz tartozó kompatibilitási egyenletek egyetlen mátrixegyenletbe vonhatók össze, amelynek alakja

$$\mathbf{DZ} + \widetilde{\mathbf{D}} = \mathbf{0}. \tag{10}$$

Ebből

$$\mathbf{Z} = - \mathbf{D}^{-1} \cdot \widetilde{\mathbf{D}}. \tag{10a}$$

$\mathbf{Z}$ segítségével külön-külön meghatározható az egyes (pontonként) független 0, 1, . . ., i, . . ., k helyek méreteltéréseinek szórásából a szerkezet igénybevételének egyenkénti szórása $\mathbf{M}$, vagyis

$$\mathbf{M}^* = \mathbf{m}^* \mathbf{D}^{-1} \mathbf{D},$$

ahol

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \widetilde{M}_1 \\ \widetilde{M}_2 \\ \vdots \\ \widetilde{M}_i \\ \vdots \\ \widetilde{M}_k \end{bmatrix}$$

(Megjegyezzük, hogy a dolgozatban eddig használt jelöléstől eltérően a nagybetűs jelölés ($\mathbf{M}$) nem téglalapmátrixot, hanem oszlopvektort jelent.)

Az oszlopvektor $\widetilde{M}_i$ eleme megadja az i-edik helyen mérhető méreteltérés szórásának hatására keletkező igénybevétel-szórást s függvényében, feltételezve, hogy a többi összeerősítési pontban ugyanekkor a méreteltérés szórása zérus nagyságú, vagyis a két összeerősítendő elem az i-edik összeerősítési pont kivételével minden további kapcsolati helyen pontos méretre készül.

A teljes igénybevétel szórása, vagyis a méretpontatlanságok egyidejű figyelembevételével számított igénybevétel szórása a részszórások négyzetösszegéből vont négyzetgyökkel határozható meg:

$$\widetilde{M} = \sqrt{\widetilde{M}_1^2 + \widetilde{M}_2^2 + \ldots + \widetilde{M}_i^2 + \ldots + \widetilde{M}_k^2} = \sqrt{\mathbf{M}^* \, \mathbf{M}}, \tag{12}$$

vagy röviden

$$\widetilde{M}(s) = |\mathbf{M}(s)|. \tag{12'}$$

Ezzel az egyes méretpontatlanságok eloszlását ismerve (vagyis normális eloszlásnál, a várható értékek és szórások ismeretében) előállítható a járműszerkezet igénybevételének eloszlásfüggvénye is, vagy ami azt teljes mértékben jellemzi, a teljes igénybevétel várható értéke és szórása a mindenkori s koordináta függvényében.

4. A valószínűségszámítással kapott eredmények felhasználása a jármű méretezéséhez

Normális pontatlanság-eloszlást feltételezve és felvéve azt, hogy a teljes igénybevétel tűréstartományát az igénybevétel várható értéke körül a szórás $\pm$ háromszorosával korlátozzuk (ezzel az előforduló esetek 99,7%-át figyelembe vettük, 3 tized %-os valószínűséggel a számított maximális, illetve minimális igénybevételnél nagyobb, illetve kisebb igénybevételt is megengedve), a méretezés alapösszefüggése az alábbi egyszerű formában adható meg:

$$|M_{\text{meg}}(s)| \geq \left|\overline{M}(s) \pm |3\widetilde{M}(s)|\right|. \tag{13}$$

Itt $M_{\text{meg}}(s)$ a tartószerkezet s koordinátájú pontjában általunk előírt megengedhető igénybevételt (jelen összefüggésben a hajlítónyomatékot) jelenti.

Gyakorlati számításokban az igénybevételt nem célszerű s folytonos függvényeként jelölni. Egyszerűbb számítási eljáráshoz jutunk, ha feltételezzük, hogy az egységterhelésekből keletkező igénybevételek a tartóhossz mentén, szakaszonként állandó értékkel, vagy nagyobb numerikus pontosságra törekedve, szakaszonként lineárisan, esetleg parabolikusan változó függvényekkel közelíthetők meg. A következőkben tételezzük fel, hogy elég sűrű szakaszosztást választva, a szakaszonként lineáris közelítés megengedhető, és a tartó merevsége legalább szakaszonként állandó.

A közelítő lineáris függvényt két adattal, a célszerűen a szakasz elején és szakasz végén felvett függvényértékkel adhatjuk meg. Az egységterhelésekből számított igénybevételeket így az $\mathbf{m}$ oszlopvektor helyett az $\mathbf{N}$ téglalapmátrixal adhatjuk meg, mely n-szeresen határozatlan szerkezetnél n sor és p

szakasz esetében $2p$ oszlopot tartalmaz [5]. A kompatibilitási egyenlet együtthatómátrixa

$$\mathbf{D} = \mathbf{NRN}^*$$

formában állítható elő, ahol az **R** kifejezés 2.2-es blokkokból felépített diagonális hipermátrix, az ún. rugómátrix. Ezek segítségével az igénybevételek most már csak a szakaszhatárokon vizsgálva

$$\left\|[\mathbf{M}_{meg}]\right\| \geq \left\| \mathbf{N}^*(\mathbf{NRN}^*)^{-1}\,\bar{\mathbf{d}} \pm 3\,|\mathbf{N}^*(\mathbf{NRN}^*)^{-1}\,\tilde{\mathbf{D}}|\right\| \tag{14}$$

($\mathbf{M}_{meg}$ a fenti összefüggésben $2p$ elemű oszlopvektort jelent. A két vonásos abszolútérték jel arra utal, hogy a vektor abszolút értékekből áll, az egy vonásos abszolútérték jelzés a szórás téglalap-mátrixának sorvektoraihoz tartozó normákból képzett, ugyancsak $2p$ elemű oszlopvektort jelent.)

A (14) számú mátrix-egyenlőtlenség (illetve határesetben egyenlőség) d szakasz esetében $2p$ skaláris egyenlőtlenséggel, illetve határesetben egyenlőséggel egyenértékű.

5. Egyöntetű mérettűrés megadása

Az üzemi gyakorlatban a technológiai feltételek kötöttsége miatt a szerkezet egészére vagy annak fő részeire (alváz, karosszéria) általában azonos mérettűrést célszerű előírni. Az egyöntetű mérettűrés előírása lehetővé teszi az előzőkben tárgyalt feladat inverzének a megoldását is, nevezetesen a megengedhető igénybevételt rögzítve előírható a kapcsolódási pontokban megkívánt méretpontosság, azaz méreteltérések tűrésmezeje.

Tételezzük fel, hogy az egyelőre ismeretlen teljes tűrésmező minden összeépítési pontban a cm nagyságú (kivéve a szerelés első lépésében, statikailag határozott módon összekapcsolt pontokban, ahol a méretpontatlanság várható értéke és szórása is zérus) és a szerkezeti elemek méretei várhatólag a tűrésmező közepe tájékán sűrűsödnek, azaz a szerkezeti elemek zömmel névleges mérettel készülnek, és ettől a mérettől legfeljebb $\pm a/2$ cm-rel térhetnek el. Tételezzük fel továbbá, hogy az összes legyártott darabok 99,7%-a az előírt tűrésmezőn belül helyezkedik el, vagyis a teljes tűrésmező a méretszórás hatszorosával egyenlő.

Ebben az esetben $\bar{\mathbf{d}}$ és $\tilde{\mathbf{D}}$ az a tűrésmező-szélességből és az 1 cm-es méretpontatlanságból számított $\bar{\mathbf{d}}'$, valamint az ugyancsak 1 cm-nek tekintett méretpontatlanság-szórásból számított $\tilde{\mathbf{D}}'$ értékekből számítható:

$$\bar{\mathbf{d}} = \frac{a}{2}\,\bar{\mathbf{d}}'$$

és

$$\tilde{\mathbf{D}} = \frac{a}{6}\,\tilde{\mathbf{D}}'.$$

Ezeket az összefüggéseket értelemszerűen alkalmazva

$$|M_{meg}(s)| \geq \left| \frac{a}{2} \left[\mathbf{m}^*(s)\,\mathbf{D}^{-1}\bar{\mathbf{d}}' \pm |\mathbf{m}^*(s)\,\mathbf{D}^{-1}\tilde{\mathbf{D}}'| \right] \right|, \tag{15}$$

minden s-re, vagy az igénybevételt s folytonos függvénye helyett szakaszonként lineáris igénybevétellel helyettesítve,

$$|\mathbf{M}_{meg}| \geq \left| \frac{a}{2} \left[\mathbf{N}^*(\mathbf{N}\mathbf{R}\mathbf{N}^*)^{-1}\bar{\mathbf{d}}' \pm |\mathbf{N}^*(\mathbf{N}\mathbf{R}\mathbf{N}^*)^{-1}\tilde{\mathbf{D}}'| \right] \right| = \frac{a}{2}\,|\mathbf{M}_{mért}| \tag{15'}$$

minden szakasz elején és végén.

$\mathbf{M}_{mért}$-val az egyes szakaszhatárokra adódott igénybvételek $2p$ elemű oszlopvektorát jelöltük.

Az egyenlőtlenségek határhelyzetben egyenlőségbe mennek át, és az egyenlőségekből a-ra vonatkozólag $2p$, általában egymástól különböző tűrésmezőérték adódik. Ezen a értékek minimális értéke adja az egész szerkezetre vonatkozólag egyöntetűen betartandó tűrésmező-szélességet.

6. Számpélda

A 3. ábrán feltüntetett egyszeresen határozatlan síkbeli rácsos szerkezet rúderőinek változását vizsgáljuk meg, ha

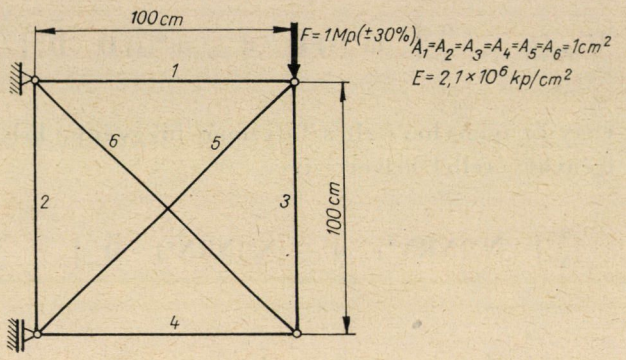
1. a 6. jelű rúd hosszának tűrésmezeje a névleges méret ± 1 mm;
2. az 5. és 6. rúd hosszának tűrésmezeje a névleges méret ± 1 mm;
3. az összes rúd hosszának tűrésmezeje a névleges méret ± 1 mm;
4. A külső terhelőerő tűrésmezeje a névleges terhelés $\pm 30\%$.

A számításokat a dolgozatban vázolt valószínűségszámítási megfontolással végeztük el, tehát feltételeztük, hogy a rudak mérete is és az erő nagysága is normális valószínűségi eloszlást követ, továbbá a rudak mérete, valamint az erő nagysága is páronként egymástól független. A kinematikai terhelések számításakor kihasználtuk azt az előnyt, hogy a rudak méreteltérése a rudak — és így az egész szerkezet — méretéhez képest jelentéktelen, azaz a számításokban feltételeztük, hogy az egyes rudak egymással bezárt szöge a méretpontatlanság ellenére sem változik jelentősen. A számítás eredményeit az I. és II. sz. táblázatban foglaltuk össze.

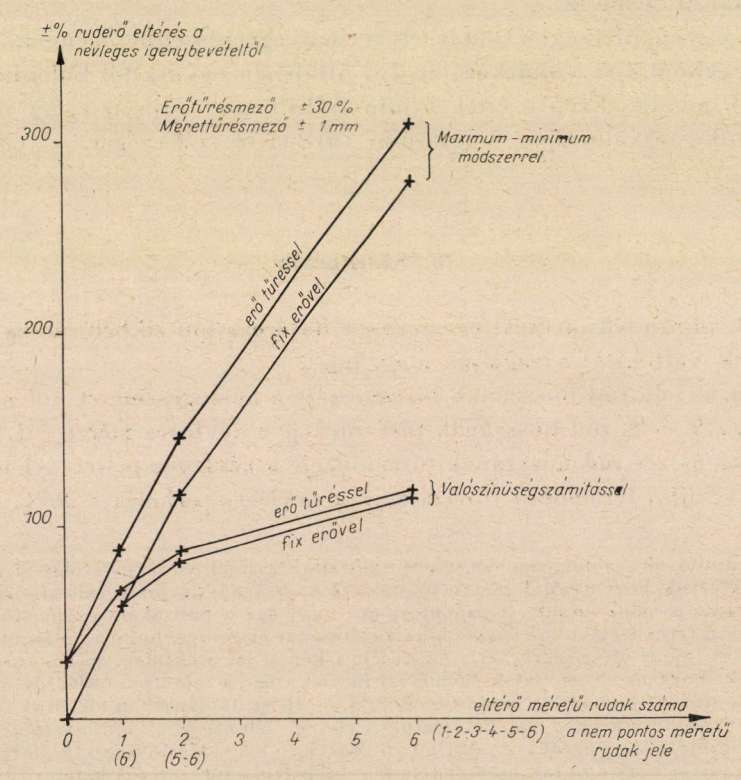
Összehasonlításképpen meghatároztuk a rúderő változását az ún. maximum-minimum módszer alapján is, azaz azzal a gyakorlatban csak igen kis valószínűséggel előforduló feltételezéssel számolva, hogy a rudak hosszmérete kivétel nélkül a tűrésmezők határára esik, éspedig úgy, hogy az ebből származó igénybevételek kedvezőtlenül összegeződjenek (pl. mindkét átlő

a tűrésmező felső, ugyanakkor az összes övrúd a tűrésmező alsó határára esik, vagy fordítva). Ugyancsak megvizsgáltuk azt az esetet is, amikor a rúdméretek legkedvezőtlenebb elrendezése mellett a külső terhelés is a tűrésmező határára esik. A maximum-minimum módszerrel végzett vizsgálat eredményeit a III. sz. táblázatban tüntettük fel. (A II. és III. táblázat fejléce az I. táblázat fejlécéből értelmezhető.)

Az egyes számítások végeredményét (a rúderők névleges értéktől történő %-os eltérését) a 4. ábrán tüntettük fel. Meg kell jegyezni, hogy a diagramból csak a kereszttel megjelölt



3. ábra



4. ábra

pontok értelmezhetők, a közbenső vonalakat csak az áttekinthetőség javítása érdekében tüntettük fel.

Nem vizsgáltuk a számpéldában a járulékos terhelésből esetlegesen bekövetkező plasztikus alakváltozás, illetve a nyomott rudak kihajlása következtében bekövetkező igénybevételváltozás következményeit.

A rúderők és azok szórása valószínűségszámítási megfontolással

1. táblázat

A rúd jele	A névleges rúderő nagysága kp	A 6. rúd méret szórása (1/3 mm) következtében fellépő rúderő szórás kp	Az 5. és 6. rúd méret szórása (1/3 mm) következtében fellépő rúderő szórás kp	Az 1., 2., 3., 4., 5., 6. rúd méret szórása (1/3 mm) következtében fellépő rúderő szórás kp	A külső terhelés szórása (10%) következtében fellépő rúderő szórás kp	A 6. rúdhossz és a külső terhelés egyidejű figyelembevételével számított rúderő szórás kp	Az 5. és 6. rúdhossz, valamint a külső terhelés egyidejű figyelembevételével számított rúderő szórás kp	Az 1., 2., 3., 4., 5., 6. rúdhossz és a külső terhelés egyidejű figyelembevételével számított rúderő szórás kp
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
1	+500							
2	+500	98	137	193	50	109	146	199
3	−500							
4	−500							
5	−707							
6	+707	138	194	274	71	154	207	284

A rúderők és azok tűrésmezője (± 3-szoros szórás) valószínűségszámítási megfontolással

2. táblázat

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
1	+500							
2	+500	±293	±411	±580	±150	±327	±438	±597
3	−500							
4	−500							
5	−707	±414	±582	±820	±210	±462	±620	±852
6	+707							

A rúderők és azok tűrésmezője maximum-minimum módszerrel számítva

3. táblázat

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
1	+500							
2	+500	±293	±586	±1402	±150	±443	±736	±1552
3	−500							
4	−500							
5	−707							
6	+707	±414	±828	±1998	±210	±624	±1038	±2208

IRODALOM

1. MICHELBERGER, P.: Die von Montage-Ungenauigkeiten stammenden Innenkräfte bei dem Zusammenbau von Fahrgestell und Wagenkasten eines Autobusses. *Acta Techn. Hung.*, **44** (1963), 313—328.
2. MICHELBERGER, P.—KÖRMENDY, I.: Auswahl der Fertigungstoleranzen beim Zusammenbau von Wagenkasten und Fahrgestell an Autobussen mit Fahrgestell. *Periodica Polytechnica*, **8** (1964), 248—258.
3. MICHELBERGER, P.: Some Problems on Prestress of Vehicle Structures. *Proceedings of the Second Conference on Dimensioning and Strength Calculations.* Akadémiai Kiadó. Budapest 1965, 93—104.
4. MICHELBERGER, P.: Járműszerkezetek előfeszítésének néhány kérdése. *MTA VI. Oszt. Közl.*, **37** (1966), 193—205.
5. GERBETH, : Matrizenkraftgrössenverfahren zur Berechnung hochgradig statisch unbestimmter Systeme. *IfL Mitteilungen*, Dresden (1964).

Berechung der durch die Fertigungsungenauigkeiten des Fahrgestells hervorgerufenen Montagespannungen mit Hilfe des Matrizen-Kraftgrößen-Verfahrens. Zur Berechung der Montagespannungen von Fahrgestellen, bzw, der nach den vorschriftsmäßigen Beanspruchungen zulässigen Fertigungsungenauigkeiten können durh Vereinfachung des statischen Modells vorteilhaft Differenzgleichungen verwendet werden. Zur Ermittlung der zulässigen Fertigungstoleranz können einfache geschlossene Formeln abgeleitet werden. Im Fall von unregelmäßigen Konstruktionen die mit genügender Genauigkeit schon nicht mehr durch das vereinfachte Modell ersetzt werden können, ist es zweckmäßig die kinematischen Belastungen mit Hilfe der Matrizenrechung zu analysieren. Dabei kann die auch ansonsten zur Verfügung stehende Reziproke der Koeffizientenmatrix der Kompatibilitätsgleichung angewendet werden. In solchen Fällen kann die in der technologischen Anweisung vorgeschriebene Fertigungstoleranz (d. h., die zulässige Fertigungsungenauigkeit anstelle einer einzigen skalaren Ungleichheit (im Grenzfall: Gleichheit) aus einer Matrizenungleichheit ermittelt werden.

Calculation of Mounting Stresses Induced by Inaccurate Manufacturing of Vehicle Frameworks with the Aid of the Matrix Force Methods. For the calculation of the mounting stresses of vehicle structures, or in the case of specification of the permissible stress values, by simplifying the static model, difference equations may successfully be applied. For the determination of the permissible fabrication tolerances, simple, closed formulas may be derived. In the case of irregular structures which cannot be simulated with satisfactory accuracy by a simplified model, it is convenient to analyse the kinematic loads with the aid of matrix calculation. Here, the inverse of the coefficient matrix of the compatibility equation being anyway available, might be used. The size tolerance (i.e., the permissible inaccuracy in fabrication) to be prescribed by the technological instructions may, in such cases, be determined from a matrix unequality instead of a single scalar unequality (in the limiting case: equality).

A KAPACITÍV KISÜLÉSEK FELÉPÜLÉSÉRŐL

BITÓ JÁNOS*
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK DOKTORA
és
ANTAL KÁLMÁN**

[Beérkezett: 1971. dec. 20]

Áttekintjük és rendszerezzük a kapacitív kisülések felépülésénél lejátszódó kisülési folyamatokat. Bemutatjuk az eddig alkalmazott, elterjedtebb függetlenrészecskés és statisztikus leírásokat, utalva az ezeknél felhasznált közelítések érvényességi körére és korlátaira. A felépülési modellek és átütési kritériumok kritikai értékelésén keresztül jellemezzük e módszerek alkalmazhatóságát és finomításuk lehetőségeit.

A külsőelektródos (kapacitív) kisüléseknél az átütés szigetelőfalú kisülési edényben, az edény falaira kívülről felhelyezett fém elektródok között jön létre. Felépülését első ízben JOSHI és munkatársai [1, 2, 3, 4, 5], majd HARRIES és ENGEL [6, 7] tanulmányozták, s több közelítő modellt állítottak fel. Nemesgázok esetében először BHATAWDEKAR [8] végzett kutatásokat, amelyek eredményeit felhasználva BAKKAL és LOEB [9, 10] folytatta a kapacitív kisülések részletesebb tanulmányozását.

A kapacitív kisülések közvetlen gyakorlati alkalmazhatósága az elmúlt években egyre világosabbá vált. Átütésre jellemző paramétereik meghatározásával például lehetőség nyílik a néhány torr nyomású nemesgáz—Hg keverékben a 10^{-4} torr körüli parciális nyomással jelenlevő szennyezők gyors, közvetlen kimutatására [11, 59].

1. Külsőelektródos kisülések átütést megelőző folyamatai periodikus külső tér esetén

1.1. *Általános áttekintés*

Az időben váltakozó periodikus elektromos terek hatására végbemenő ionizációs jelenségek több fontosabb vonásban különböznek az időben állandó terek esetében fellépő ionizációs folyamatoktól:

— Mivel az elektromos tér periodikusan változtatja irányát, a töltéshordozók nem feltétlenül jutnak el az elektródokra vagy a falakra. Így a kisebb felületi rekombináció miatt az átütéshez szükséges energiával rendelkező, megfelelő számú töltéshordozó (kritikus töltéshordozó koncentráció) kisebb térerősségnél is kialakulhat. A periodikus tér egyben esetenként másodlagossá

* Dr. Bitó János, Budapest XII., Korompai u. 22/a.
** Antal Kálmán, Budapest XX., Vécsei úti ltp. 4. ép.

teheti a felületi töltéshordozó rekombinációt és generációt eredményező jelenségeket.

— A töltéshordozók, gerjesztett atomok és fotonok felületi kölcsönhatásából származó szekunder töltéshordozók csak abban az esetben járulnak hozzá az ionizációs folyamatokhoz, ha keletkezésük a tér valamely kedvező, pillanatnyi irányával egybeesik.

— Periodikus külső tér esetén, szigetelő falú kisülési edényben, belső fémelektródok nélkül is kialakulhat a lavinafolyamat, amely önfenntartó kisüléshez vezethet. A töltéshordozók drift mozgása miatt a falak között az elektromos tér periodicitását nem követő sztatikus terek alakulhatnak ki, s ezek erősen befolyásolhatják az ionizációs folyamatokat. Ezen sztatikus tér nem egyenértékű az egyenáramú kisüléseknél kialakuló tértöltési terekkel. Az átütési jelenségeket az említett sztatikus tér és a periodikus külső tér szuperpozíciója szabja meg. Emiatt a kialakuló kapacitív kisülés periodicitása nem feltétlenül esik egybe az alkalmazott külső térével.

Átütési kritériumként azt a kritikus térerősséget adhatjuk meg, amelynél a kisülés áram-feszültség karakterisztikájának kezdeti szakaszán az első $dI/dV \to \infty$ jelentkezik, ahol I — a kisülési áram; V — pedig a kisülés teljes potenciálesése.

Az E_k kritikus átütési térerősséget, valamint a kisülés j áramsűrűségét az alábbi paraméterek határozzák meg:

— A p gáznyomás, s az ennek megfelelő, elektronokra vonatkozó λ_e közepes szabad úthossz, valamint az elektronok és gázmolekulák közötti ν_e ütközési frekvencia, amely a $\nu_e = v_r/\lambda_e$ összefüggéssel jellemezhető, ahol v_r az elektronok random (rendszertelen, v. termikus) sebessége.

— Az alkalmazott E elektromos tér ω frekvenciája vagy λ hullámhossza. A periodikus külső teret az

$$E = E_0 \sin \omega t = E_0 \sin \frac{2\pi c}{\lambda} t$$

alakban adjuk meg, ahol t az idő és c a fénysebesség.

— A kisülési edény méretei, egyszerűbb esetben a térirányba eső d edényhossz, valamint az r sugár.

— A kisülési edény falainak kisülési szempontból számításba jövő tulajdonságai (pl. adszorbciós képessége).

1.2. *Az átütést megelőző folyamatok csoportosítása*

Az átütési jelenségek és ionizációs folyamatok csoportosítását az áttekintésben megadott

$$\lambda_e, \nu_e — d, r, \omega$$

paraméterek alapján végezhetjük el.

Laboratóriumi kisüléses rendszereknél — általában néhány cm-es karakterisztikus méretű kisülési edények esetén — a fenti paraméterek felhasználásával az alábbi jellegzetes ionizációs jelenségcsoportokat különböztethetjük meg:

$$A - \lambda_e \geqslant d, r.$$

Igen kis nyomásoknál, ahol $\lambda_e \geqslant d, r$, nyilvánvalóan a felületi jelenségek szabják meg az ionizációs folyamatokat, hiszen ez esetben a térfogati jelenségek — statisztikus értelemben — elhanyagolhatók a fali folyamatokhoz képest. Az átütési mechanizmust a felületeken lejátszódó kölcsönhatási jelenségek szabják meg. Ez esetben az alkalmazott külső tér frekvenciájának figyelembevétele nem jelenti a csoportosítás érdemleges finomítását.

$$B - \lambda_e < d, r.$$

Közepes vagy nagy nyomáson, ahol $\nu_e < d, r$, már indokolt a külső tér frekvenciája szerinti felbontás.

B.1 — $\omega < \nu_e$

Abban az esetben, ha az $\omega < \nu_e$, azaz „alacsony" frekvenciánál (viszonyítási alapként az elektron—gáz ütközéseket jellemző frekvencia szolgál), a külső elektromos tér minden félperiódusában nagyszámú térfogati ütközés következik be. Az elektronok felhőszerűen követik a tér fázisváltozásait, mozgásuk leírására a drift sebességgel képzett mozgékonyság alkalmas.

A frekvencia nagyságától függően további két jelenségcsoport választható szét:

B.1.1 — $\omega > v_d/d$

Ha az ω frekvencia elég nagy, azaz az

$$\omega > v_d/d$$

reláció áll fenn, akkor az elektrongáz rezgéseinek amplitúdója kisebb a kisülési edény méreteinél, ami azt eredményezi, hogy a töltéshordozó generálás döntően térfogati jelenség, a veszteségek viszont a falak felé irányuló diffúziós mozgások eredményeként lépnek fel.

B.1.2 — $\omega \leqslant v_d/d$

Ha az ω frekvencia viszonylag kicsiny, azaz az

$$\omega \leqslant v_d/d$$

egyenlőtlenség áll fenn, akkor az elektrongáz rezgéseinek amplitúdója megegyezik a kisülési edény méreteivel, vagy annál nagyobb, ami azt eredményezi,

hogy a drift-koncepció érvényesülésével az elektrongáz minden félperiódusban kölcsönhatásba lép a falakkal. Ekkor az ionizációs mechanizmusban alapvető szerepet játszanak a fali kölcsönhatások, sőt a külső periodikus tér hatása mellett egy, a fali feltöltődésből származó sztatikus térrel is számolnunk kell.

B.2 — $\omega \geqslant \nu_e$

Általános megjegyzésként megállapítható, hogy az $\omega \geqslant \nu_e$ eset a leírásmód szempontjából az *A* esethez hasonlóan kezelhető, azzal a különbséggel, hogy az edényméretek helyett a szabad úthossz tekinthető karakterisztikus méretként. Indokolt azonban a frekvencia szerinti további felbontás:

B.2.1 — $\omega \sim \nu_e$

Abban az esetben, ha $\omega \sim \nu_e$, a kisülési feltételek igen széles skálája lehetséges, ez azonban a tárgyalt kisülési mechanizmusokat érdemben nem befolyásolja.

B.2.2 — $\omega > \nu_e$

Abban az esetben, ha $\omega > \nu_e$, azaz magas frekvenciáknál, minden egyes gázatomokkal történő ütközés között az elektronok nagyszámú kisamplitúdójú rezgéseket végeznek. Ekkor az egész elektrongáz kvázistacionáris, azaz drift-mozgást nem végez. Kvázistacioner állapotát csak a diffúzió zavarja.

B.3 — $\omega \gg \nu_e$

Abban az esetben, amikor $\omega \gg \nu_e$, azaz igen magas frekvenciánál, az elektronok viselkedését nem közvetlenül a külső tér szabja meg, hanem a keletkező elektromágneses rezgések elektromos és mágneses tere. A keletkező elektromágneses hullámok amplitúdóját és térbeli eloszlását a frekvencia és a kisülési geometria mellett a kialakuló rezgési módus szabja meg, ugyanúgy, mint az üregrezonátorokban és mikrohullámú térvonalakban.

A fenti csoportosításban összefoglalt effektusokat és azok jellegét, természetszerűleg minden további külső elektromos vagy mágneses tér erősen módosíthatja. Ez mind a kisülés megindulásánál, mind pedig annak fenntartásánál jelentkezik.

2. Az átütést megelőző folyamatok elméleti leírása

Az átütést megelőző folyamatok elemzése kétféle módszerrel végezhető el. Az egyik esetben a háromfolyadékos modellből (elektron, ion, semleges atom) kiindulva, a mozgásegyenlet és a részecskék viselkedésére jellemző további összefüggések vizsgálatával, a megfelelő peremfeltételek és kezdeti feltételek figyelembevételével adhatunk meg leírást. A másik esetben a transzportegyen-

letek statisztikus módszerekkel történő elemzésével lehet következtetéseket levonni a periodikus külső tér esetén fellépő, átütést megelőző folyamatokra vonatkozóan.

A most következőkben mindkét esetben megadjuk a kiindulásként szolgáló alapösszefüggéseket, és utalunk azok egyes, az előzőekben bemutatott ionizációs jelenségcsoportoknál való alkalmazhatóságára.

2.1. *Függetlenrészecskés leírás*

Kiindulási alapként a mozgásegyenlet szolgál, amelyet az elektronokra és az egyszeresen töltött pozitív ionokra, egydimenziós esetre korlátozódva, a következő formában írhatunk fel:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + mv\frac{dx}{dt} = eE_0 \sin(\omega t + \chi), \tag{1}$$

ahol m — a részecskék tömege,
x — az elmozdulás,
t — az idő,
v — a töltött részecskék semleges gázatomokkal való ütközési frekvenciája,
e — a részecskék töltése,
E_0 — a periodikus külső elektromos térerősség amplitúdója,
ω — a külső tér frekvenciája,
χ — a $t = 0$ időpillanatban a külső tér fázisszöge.

Az (1) mozgásegyenlet bal oldalán szereplő második tag a részecskék ütközési folyamatai során bekövetkező impulzusváltozást jelzi. Az itt megadott v a szokásos módon a

$$v = \frac{1}{\tau} \tag{2}$$

összefüggéssel jellemezhető, ahol τ a részecskék két ütközése között eltelt időt adja.

Az (1) mozgásegyenletet integrálva, a részecskék sebességét a következő általános alakban adhatjuk meg:

$$v = \frac{dx}{dt} = b_1\omega\sin(\omega t+\chi) + b_2\omega\cos(\omega t+\chi) + c_1 e^{-\nu t}, \tag{3}$$

ahol

$$b_1 = -\frac{ve\,E_0}{m\omega(\omega^2+v^2)}; \qquad b_2 = -\frac{eE_0}{m(\omega^2+v^2)},$$

c_1 az integrálásból származó tetszőleges konstans. Bevezetve az ütközések következtében fellépő fáziseltolódást

$$\varphi = \operatorname{arc\,tg}\frac{v}{\omega} \tag{4}$$

a sebességre kapott (3) kifejezés a következő egyszerűbb alakban írható fel:

$$v = A\omega \cos(\omega t + \chi + \varphi) + c_1 e^{-rt}, \tag{5}$$

ahol

$$A = -\frac{eE_0}{m\omega(\omega^2+r^2)^{1/2}}.$$

A kapott kifejezés elemzését a korábban megadott ionizációs jelenségcsoportok figyelembevételével végezzük.

$A - \lambda \geqslant d, r$

Igen kis nyomáson, amikor a szabad úthosszak összevethetők a kisülési edény méreteivel, a részecskék közötti ütközéseket gyakorlatilag elhanyagolhatjuk. Ily módon a (5) képletben a $r = 0$ formális behelyettesítést elvégezve, s figyelembe véve a

$$v|_{t=0} = v_0$$

kezdeti feltételt, a részecskék sebességére a

$$v = v_0 + \frac{eE_0}{m\omega}[\cos\chi - \cos(\omega t+\chi)] \tag{6}$$

kifejezés adódik. A (6) képlet további integrálásával, s az

$$x|_{t=0} = x_0$$

peremfeltétel felhasználásával, a részecskék koordinátája az alábbi kifejezéssel jellemezhető:

$$x = x_0 + \left(v_0 + \frac{eE_0}{m\omega}\cos\chi\right)t + \frac{eE_0}{m\omega^2}[\sin\chi - \sin(\omega t - \chi)]. \tag{7}$$

Mint látható, a részecskék sebessége a kezdeti sebességtől, valamint a külső térnek a bekapcsolás pillanatában vett fázisszögétől függő állandó sebességösszetevőből és egy harmonikus komponensből tevődik össze. Utalunk arra is, hogy a harmonikus összetevő fázisa 90°-kal elmarad a külső tér fázisától, s így a külső tértől való energiafelvétel szempontjából reaktívnak tekinthető. A harmonikus összetevőt figyelmen kívül hagyva, a külső tértől felvett energia akkor maximális, ha a bekapcsolás pillanatában a fázisszög nullával egyenlő. A külső tér frekvenciájának növelésével az energianyereség egyre csökken.

Összefoglalva, kis nyomásoknál, mint az a (6) és (7) képletekből is kitűnik, a részecskék mozgását, a külső tértől való energiafelvételt döntően a kezdeti és peremfeltételek befolyásolják, így a már említett „fali" jellemzőkön kívül jelentős szerepet kapnak az átütési kritériumok felállításánál.

B — $\lambda < d, r$

Közepes, vagy nagy nyomásoknál, amikor a szabad úthosszak kisebbek a kisülési edény méreteinél, azaz $\lambda < d, r$, nemcsak a falakon lejátszódó jelenségek hatása csökken, hanem a kezdeti és peremfeltételek is módosulnak. Ez esetben ugyanis már a kollektív jelenségek dominálnak, s a függetlenrészecskés leírás a feladat megoldását csak bizonyos közelítésekkel adja meg. Itt a v sebesség már nem kapcsolható össze az egyes individuális részecskék sebességével, hanem egy megadott csoportra vonatkozik. Ennek tükröződni kell a kezdeti és peremfeltételek megválasztásánál.

Továbbra is követve az átütési folyamatok korábban megadott csoportosítását, elemezzük az (1) mozgásegyenlet megoldását.

B.1 — $\omega < \nu$

Ha a külső tér frekvenciája alacsonyabb az ütközési frekvenciánál, $\omega < \nu$, a (4) képlettel jellemezhető járulékos fázisszög határértékben tart $\pi/2$-höz, ami azt jelenti, hogy a részecskék csoportba tömörülve, felhőszerűen követik a külső tér fázisát. A

$$v|_{t=0} = v_0$$

kezdeti feltételt is figyelembe véve, valamint a (4) képlet által meghatározott φ szög helyett a

$$\psi = \operatorname{arc\,tg} \frac{\omega}{\nu}$$

fázisszögre áttérve, a részecskék sebessége a

$$v = \frac{eE_0}{m\sqrt{\nu^2+\omega^2}} \sin(\omega t+\chi \quad \psi)+\left[v_0 \quad \frac{eE_0}{m\sqrt{\nu^2+\omega^2}} \sin(\chi \quad \psi)\right] e^{-\nu t} \qquad (8)$$

kifejezéssel adható meg. Itt már a periodikus tag csaknem teljes mértékben aktív (a külső tér fázisától csak egy ψ szöggel tér el, amely az ω/ν viszony csökkenésével nullához tart). Ez egy igen érdekes paradoxon, hogy az ütközési frekvencia növekedésével a külső tértől felvett energia váltakozóáramú kisüléseknél növekszik, míg az egyenáramú kisüléseknél a töltött részecskék és a gázatomok közötti rugalmas ütközések egyértelműen veszteséget jelentenek. A (8) kifejezésben álló második, nem periodikus tag, a külső tér periódusa által meghatározott karakterisztikus időtől és az ütközési frekvenciától függően, exponenciálisan nullához tart. Fizikailag ez azt jelenti, hogy a random mozgás az ütközési frekvencia növekedtével egyre inkább irányított, drift mozgásba megy át. Minél kisebb az ω/ν viszony, annál jobb közelítésben tekinthetünk el a kezdeti feltételektől, azaz a térirányú harmonikus mozgás mellett a ran-

dom mozgástól és a külső tér kezdeti fázisszögétől függő egyenesvonalú sebességösszetevőtől.

A (8) képletben a második tagot figyelmen kívül hagyva, az integrálás elvégzése után a részecskecsoport koordinátája az

$$x = \frac{eE_0}{m\omega\sqrt{\nu^2+\omega^2}} \cos(\omega t + \chi - \psi) + x_0 \tag{9}$$

képlettel adható meg. Mint arra már utaltunk, ez egy x_0 (a $t = 0$ időpillanatban vett koordináta) pont körüli harmonikus mozgást jellemez. A rezgés amplitúdója egyenesen arányos a külső tér erősségével, s fordítva arányos az ütközési frekvencia és a külső tér frekvenciájának szorzatával.

A korábban megadott csoportosításban, a rezgések amplutúdójának és a kisülési edény méreteinek összehasonlítása alapján végzett további felbontás nem csupán az átütési kritériumok felállításánál figyelembe veendő csoportosítást jelent, hanem az átütést követő kisülés jellemzésénél is szerepet játszik. A *B.1.2* pontban közölt esetben ugyanis a váltakozó külső térerősség mellett a mozgásegyenlet felírásánál figyelembe kell venni a falakon felhalmozódott töltés által kialakított sztatikus tereket is. Így a kapott megoldáshoz (8) első közelítésben egy kvázistacioner összetevő is járul. Ez az összetevő azért tekinthető kvázistacionernek, mert nagysága csak egy fél perióduson belül állandó, ugyanis az ellenkező fél periódusban a falon felhalmozódó töltések teljességben vagy részben semlegesítődnek az odaérkező ellentétes polaritású részecskék által. Erre, a speciálisan csak szigetelő falú kisülési edényekben lejátszódó jelenségre, a későbbiekben még részletesebben visszatérünk.

Igen kis frekvenciáknál és nagy kisülési edényméreteknél (a viszonyítás az ütközési frekvenciához és a szabad úthosszakhoz történik) még egy igen elterjedt [12, 13] tárgyalásmód az egyenáramú analógia bevezetése.

Ismeretes ugyanis, hogy az áramsűrűség

$$j = env \tag{10}$$

kifejezéssel adható meg, ahol

n – a töltött részecskék koncentrációja,
v – a töltött részecskék drift sebessége,

s az egységnyi térfogatban a külső tértől felvett teljesítmény pedig

$$P = jE \tag{11}$$

képlet alapján számítható. A sebességet a (8) képletből (az exponenciálisan csökkenő tagot elhanyagolva, s a külső tér kezdeti fázisát zérónak véve) be-

helyettesítve, ez a teljesítmény a következő lesz:

$$P_{\sim} = \frac{ne^2 E_0^2}{2m} \frac{\cos\psi \cos 2\omega t}{\sqrt{\nu^2 + \omega^2}}. \tag{12}$$

Ezt a kifejezést egy periódusra átlagolva azt kapjuk, hogy

$$\bar{P}_{\sim} = \frac{ne^2 E_0^2}{2m} \frac{\nu}{\nu^2 + \omega^2}. \tag{13}$$

Ugyanakkor egyenáramú esetben, figyelembe véve a Langevin-féle mozgékonyságra [14] kapott elemi kifejezést, az egységnyi térfogatban disszipált teljesítmény az alábbi formában írható fel:

$$\bar{P} = \frac{ne^2 E^2}{m\nu}. \tag{14}$$

A (13) és (14) képlet egybevetésével megadható egy $E_{\text{eff}}^{=}$ egyenáramú térerősség, amelynek hatása megfelel az $E_{\text{eff}}^{\sim} = E_0/\sqrt{2}$ váltakozóáramú térerősségnek:

$$E_{eff}^{=2} = E_{eff}^{\sim 2} \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2}, \tag{15}$$

ahol τ — a két ütközés között eltelt idő.

Az így nyert $E_{\text{eff}}^{=}$ egyenáramú térerősséget figyelembe véve, s a jelenségeket az egyenáramú leírásmód alapján értelmezve, sok esetben viszonylag egyszerűbben, az egyenáramú esetben részletesen elemzett módon nyerhetünk a kísérletekkel jó egyezést mutató eredményeket.

Visszatérve az átütési folyamatok elemzéséhez, megállapíthatjuk, hogy függetlenrészecskés leírásmód alkalmazásával a fenti feltételek mellett már eleve csak közelítő eredményeket várhatunk. Az átütési kritérium meghatározásához, a részecskék sebességére kapott kifejezés felhasználásával, s a lejátszódó egyéb elemi folyamatok (pl. különböző rugalmatlan ütközések) figyelembevételével felállított energiamérleg elemzése nyújt segítséget.

B.2 — $\omega \geqslant \nu$

B.2.1 — $\omega \sim \nu$

Ha a külső tér frekvenciája és az ütközési frekvencia azonos nagyságrendű, $\omega \sim \nu$, a részecskék sebességét megadó (8) képletben elhanyagolásokat nem tehetünk. Ez esetben az ütközés okozta fáziseltolódás $\pi/4$ körüli érték (ha $\omega = \nu$, akkor $\varphi = \pi/4$), s így minden esetben számítanunk kell egy aktív és egy reaktív áramösszetevőre.

Átütési kritérium felállításához a töltött részecskék mozgásának tanulmányozását a két ütközés közötti időszakra kell korlátozni, azaz az edényméretek helyett a szabad úthosszat kell karakterisztikus méretként tekinteni. Ezzel ugyan a fali hatásoktól első közelítésben eltekinthetünk, azonban újabb problémaként merül fel a kezdeti feltételek helyes megadása.

Itt meg kell jegyezni, hogy amennyiben az ütközési frekvencia pontosan megegyezik a külső tér f frekvenciájával, egy olyan rezonanciaállapot lép fel, amelynél a külső tértől való energiafelvétel megszűnik.

B.2.2 — $\omega > \nu$

Ha a külső tér frekvenciája nagyobb, mint az ütközési frekvencia, $\omega > \nu$, ugyanúgy mint az előző pontban megmutattuk, a kisülési edény karakterisztikus méreteiről át kell térnünk a két ütközés között megtett útra. A töltött részecskék sebességét és koordinátáit leíró egyenletek, figyelembe véve, hogy csupán két ütközés közötti mozgás leírására korlátozódunk, megegyeznek az *A.* alatt tárgyalt (6) és (7) egyenletekkel. Ha a kezdeti feltételek megadásánál a v_0 sebességet a random mozgás térirányú komponensének tekintjük, s feltételezzük, hogy a tér okozta perturbáció kicsiny, azaz a külső tér hatására keletkező drift sebességösszetevő elhanyagolható a random sebesség mellett, akkor az ütközések után kialakuló térirányú random sebesség-komponens statisztikusan nullának tekinthető ($v_0 = 0$). Ugyanilyen statisztikus megfontolások alapján az egyes ütközések pillanatában, a külső tér kezdeti fázisszögének közepes értéke ugyancsak nullának vehető. Ez a kép, amely bizonyos mértékig kombinációja a függetlenrészecskés és statisztikus elképzeléseknek, természetesen csak igen durva közelítést nyújt. Azonban, mint majd látni fogjuk az átütési jelenségek diszkussziójánál, az ilyen alapon felállított átütési kritériummal is a kísérleti eredményekkel közeli megegyező átütési feszültség-értékek adódnak.

B.3 = $\omega \gg \nu$

Abban az esetben, amikor a külső tér frekvenciája jóval magasabb, mint az ütközési frekvencia, $\omega \gg \nu$, mint arra már az átütést megelőző folyamatok csoportosításánál is utaltunk, csupán a mozgásegyenletekre támaszkodva, nem kaphatunk helyes képet. A mozgásegyenletekhez feltétlenül hozzá kell kapcsolni a Maxwell-féle egyenleteket, ily módon figyelembe véve a külső térerősség mellett a kialakuló belső elektromos és mágneses tereket.

2.2. *Statisztikus leírás*

A töltött részecskék külső elektromos és mágneses térben való mozgásának jellemzéséhez, az $f(t, \vec{r}, \vec{v})$ eloszlási függvény meghatározására szolgáló

kinetikus egyenlet az alábbi formában írható fel

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v}\nabla_r f + \frac{e}{m}\left(\vec{E} + \frac{1}{c}[\vec{v}\vec{H}]\right)\nabla_v f + S = 0, \tag{16}$$

ahol

f — az eloszlási függvény,
t — az idő,
r — a helykoordináták,
e — az elemi töltés,
m — a részecskék tömege,
$\vec{E}$ — a külső térerősség,
$\vec{H}$ — a mágneses térerősség,
c — a fénysebesség,
S — az ütközési integrál.

Az egyenletben külső erőként csupán a Lorentz-féle erőt vesszük figyelembe. Az f eloszlási függvény ismeretében számíthatók a következő makroparaméterek:

$$n = \int f d\vec{v}; \quad \vec{j} = e\int \vec{v} f d\vec{v}; \quad K = \frac{1}{n}\int \frac{mv^2}{2} f d\vec{v}, \tag{17}$$

ahol

n — a koncentráció,
$\vec{j}$ — az áramsűrűség,
K — a részecskék kinetikus energiája.

Tételezzük fel, hogy a vizsgált plazmára külső mágneses tér nem hat (H = 0), s a térbeli inhomogenitás iránya egybeesik a külső elektromos tér irányával (egydimenziós közelítés). Ez esetben az eloszlási függvény sorbafejthető a Legendre-féle polinom, $P_k(\cos\alpha)$, szerint, ahol α az $\vec{E}$ és $\vec{v}$ vektorok által bezárt szög:

$$f(t, \vec{r}, \vec{v}) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k(\cos\alpha) f_k(t, \vec{r}, \vec{v}). \tag{18}$$

Behelyettesítve a (18) sorbafejtést a (16) egyenletbe, majd beszorozva $P_{k'}(\cos\alpha)$-val, elvégezve az integrálást a szögek szerint, továbbá felhasználva a következő kifejezést

$$\vec{E}\nabla_v f = E\cos\alpha\frac{\partial t}{\partial v} + \frac{E\sin^2\alpha}{v}\frac{\partial f}{\partial(\cos\alpha)}, \tag{19}$$

kapunk egy kapcsolt egyenletrendszert az $f_0, f_1, f_2, \ldots$ komponensekre

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} + \frac{v}{3}\frac{\partial f_1}{\partial x} + \frac{eE}{3mv^2}\frac{\partial}{\partial v}(v^2 f_1) + S_0 = 0,$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + v\left(\frac{\partial f_0}{\partial x} + \frac{2}{5}\frac{\partial f_2}{\partial x}\right) + \frac{eE}{m}\left\{\frac{\partial f_0}{\partial v} + \frac{2}{5v^3}\frac{\partial}{\partial v}(v^3 f_2)\right\} + S_1 = 0, \tag{20}$$

és

$$\frac{\partial f_2}{\partial t} + v\left(\frac{2}{3}\frac{\partial f_1}{\partial x} + \frac{3}{7}\frac{\partial f_3}{\partial x}\right) + \frac{eE}{m}\left\{\frac{2}{3}v\frac{\partial}{\partial v}\left(\frac{f_1}{v}\right) + \frac{3}{7v^4}\frac{\partial}{\partial v}(v^4 f_3)\right\} + S_2 = 0, \tag{20'}$$

$$\vdots$$

ahol az ütközési integrál k-adik komponensét a következő képlet alapján határozhatjuk meg:

$$S_k = \frac{2k+1}{4\pi}\int P_k(\cos\alpha)\, d\Omega. \tag{21}$$

Itt meg kell jegyezni, hogy a kinetikus egyenlet egzakt megoldása csak két esetben, külső erők hiányában, vagy potenciális erők jelenlétében adható meg. A Boltzmann-féle egyenlet többfajta közelítő megoldása közül a kisülésfizikában a leginkább elterjedt a fentiekben bemutatott sorbafejtési módszer. A Boltzmann-féle egyenlet ilyen formában történő megoldását LORENTZ [15] adta meg első ízben a $\partial f/\partial t$ mennyiséget nullának feltételezve. Ezért a megoldást gyakran Lorentz-féle közelítésnek is nevezik.

Az átütési jelenségek vizsgálatánál fontos szerepet játszik az ütközési integrál helyes megadása. Az ütközési integrál legáltalánosabb kifejtését, csak a rugalmas kölcsönhatásokat figyelembe véve, MORSE [16] és DAVIDOV [17] adta meg. A rugalmatlan kölcsönhatásokat is figyelembe vevő ütközési integrállal csak kevés szerző foglalkozott [18] és [19]. Ez esetben ugyanis a Boltzmann-féle egyenlet elemzése rendkívül nehézkessé válik, s csak numerikus módszerekkel végezhető el. A rugalmatlan kölcsönhatásokat is figyelembe vevő ütközési integrál felhasználásával kizárólag He esetében ismeretes a teljes megoldás [20] egy viszonylag szűk E/p tartományban. Azonban az ily módon meghatározott eloszlási függvény pontossága (egyezés a kísérletileg mért adatokkal) az esetek többségében nem teszi indokolttá a nehezen kezelhető numerikus adatok alkalmazását.

Az átütési jelenségek tanulmányozásánál jóval elterjedtebb módszer az, amikor az ütközési integrálban mindössze a rugalmas kölcsönhatásokat veszik figyelembe [21—23] és [24—26], s az így meghatározott eloszlási függvény segítségével képzett átlagmennyiségekre állítanak fel különböző, a rugalmatlan kölcsönhatásokat is figyelembe vevő makroszkopikus mérlegegyenleteket.

Visszatérve a (20) és (20') végtelen számú kapcsolt egyenletekből álló egyenletrendszerre, nyilvánvaló, hogy csak akkor kapunk könnyen kezelhető megoldási módszert, ha mindössze az első néhány közelítésre korlátozódunk.

Ahhoz, hogy az eloszlási függvényre megadott sorfejtésből csak a nulladik és az első tagot vehessük figyelembe, teljesülni kell a következő két feltételnek:

$$\left|\frac{\partial f_0}{\partial v}\right| \gg \frac{1}{v^3}\left|\frac{\partial}{\partial v}(v^3 f_2)\right|. \tag{22}$$

és

$$\left|\frac{\partial f_0}{\partial x}\right| \gg \left|\frac{\partial f_2}{\partial x}\right| . \tag{23}$$

— Homogén plazma esetében, $df/dx = 0$, stacioner feltételek mellett, figyelembe véve, hogy

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} = i\omega f_1 ; \qquad \frac{\partial f_2}{\partial t} \sim i\omega f_2 ,$$

valamint az f_2 mennyiséget elhanyagolva, azt kapjuk, hogy

$$f_1 = \frac{eE}{m(i\omega+\nu)} \frac{\partial f_0}{\partial v} , \tag{24}$$

és

$$|f_2| \sim \left| \frac{eE}{m(i\omega+\nu)} \; v \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{f_1}{v} \right) \right| \sim \left| \frac{e^2 E^2}{m^2(i\omega+\nu)^2} \; v \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{1}{v} \frac{\partial f_0}{\partial v} \right) \right| . \tag{25}$$

Az S ütközési integrál momentumait a becslés leegyszerűsítésére az alábbi közelítésben vettük figyelembe

$$S_1 = \nu f_1 , \qquad S_2 \sim \nu f_2 , \tag{26}$$

ahol ν — az ütközési frekvencia. A (24) és (25) képletek alapján a (22) egyenlőtlenség az

$$\left| \frac{e^2 E^2}{m^2(\omega^2+\nu^2)} \; \frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial v} \left(v^2 \frac{\partial f_0}{\partial v} \right) \right| \ll f_0 \tag{27}$$

alakot ölti. Ha a (27) egyenlőtlenségben az elektronok közepes sebességét

$$\bar{v} \sim \sqrt{\frac{kT}{m}}$$

tekintjük, ahol T — az elektronhőmérséklet, k — a Boltzmann-féle állandó, s figyelembe vesszük, hogy

$$\frac{\partial f_0}{\partial v} \sim \frac{f_0}{\bar{v}} ,$$

akkor annak a feltétele, hogy az eloszlási függvény sorfejtésében a nulladik és az első tagra korlátozódjunk, az alábbi makro- és mikroparamétereket össze-

kapcsoló egyenlőtlenség alapján határozható meg:

$$\frac{e^2 E^2}{mkT(\omega^2+\nu^2)} \ll 1. \tag{28}$$

Ez a feltétel az alkalmazott külső térerősség nagyságának szab korlátot.

— Térbeli inhomogenitások esetén első közelítésben az egyszerűség kedvéért a külső elektromos teret elhanyagolva, a (20) egyenletek közül a másodikból azt kapjuk, hogy

$$(i\omega+\nu)f_2 \sim v\frac{\partial f_1}{\partial x}. \tag{29}$$

A (29) képletet figyelembe véve, s áttérve a középértékekre, a (24) egyenlőtlenség a következő alakban írható fel:

$$\frac{\bar{v}}{\sqrt{\omega^2+\nu^2}}\left|\frac{\partial f_1}{\partial x^2}\right| \ll \left|\frac{\partial f_0}{\partial x}\right|. \tag{30}$$

— Nem stacioner folyamatokra az előzőkhöz hasonló megfontolások alapján még egy feltételt írhatunk fel:

$$\left|\frac{\partial f_0}{\partial t}\right| \ll \sqrt{\omega^2+\nu^2} f_0. \tag{31}$$

Ennek alapján eldönthető, hogy az f kiszámításánál megállhatunk-e az első két tagnál.

A fentiekben bemutatott közelítő értékelésből is világosan kitűnik, hogy az eloszlási függvénynek a bemutatott módon történő sorbafejtésével, s az f_1-nél magasabb rendű tagok elhagyásával is igen általánosan alkalmazható egyenletrendszerhez jutunk.

Az eloszlási függvény meghatározására tehát az alábbi két kapcsolt differenciálegyenlet szolgálhat,

$$\begin{aligned} &\frac{\partial f_0}{\partial t}+\frac{v}{3}\frac{\partial f_1}{\partial x}+\frac{eE}{3mv^2}\frac{\partial}{\partial v}(v^2 f_1)+S_0=0, \\ &\frac{\partial f_1}{\partial t}+v\frac{\partial f_0}{\partial x}+\frac{eE}{m}\frac{\partial f_0}{\partial v}+S_1=0, \end{aligned} \tag{32}$$

s a megoldás

$$f(t,x,v)=f_0(t,x,v)+\frac{u_d}{v}f_1(t,x,v) \tag{33}$$

alakban írható fel, ahol $u_d/v = \cos\alpha$.

Az eredményként kapott eloszlási függvény két részből tevődik össze, egy szimmetrikus tagból és a külső elektromos tér hatására kialakuló aszimmetrikus tagból. A második tag jellemzi a töltött részecskék irányított, drift mozgását. Ez könnyen belátható, ha felírjuk a közepes térirányú sebességösszetevőt (drift sebességet)

$$\bar{u}_d = \int_0^\infty \int_0^\pi v \cos\alpha (f_0 + f_1 \cos\alpha) 2\pi v^2 \sin\alpha d\alpha dv, \tag{34}$$

elvégezve a szögek szerinti integrálást, azt kapjuk hogy

$$\bar{u}_d = \frac{4\pi}{3} \int_0^\infty f_1 v^3 dv. \tag{35}$$

Egyszerűbb esetekben, feltételezve, hogy a külső tér okozta perturbáció kicsiny, az eloszlási függvény f_0 szimmetrikus tagját a Maxwell — Boltzmann-féle eloszlási függvénnyel helyettesíthetjük. Ekkor a két kapcsolt egyenlet egymástól függetlenné válik, s a másodikból közvetlenül meghatározható az aszimmetrikus f_1 tag. Az így kapott f_1-et az első egyenletbe visszahelyettesítve, megkaphatjuk a szimmetrikus tag következő közelítését. Ezt a sorozatos közelítés módszerét alkalmazva, elérhető a kívánt pontosság. Meg kell jegyezni azonban, hogy általános esetben, matematikailag nem bizonyított ezen megoldás konvergenciája.

Az itt bemutatott módszer segítségével tehát elemezhető a részecskék közepes random sebessége és a térirányú összetevő, amelyet a függetlenrészecskés leírásmódnál a mozgásegyenletek különböző fizikai megfontolások útján történő felírása alapján határoztuk meg.

A továbblépés abban áll, hogy itt már az egyenletekben figyelembe vehetők a szabad úthosszak (vagy ütközési frekvenciák) sebesség, illetve energiafüggései, míg a függetlenrészecskés leírásnál e paramétereknek csak valamely más módszerrel meghatározott átlagos értékei szerepelnek.

Visszatérve az átütést megelőző folyamatok csoportosítására, megállapítható hogy:

A — $\lambda \geqslant d, r$

Abban az esetben, amikor a szabad úthosszak a kisülési edény karakterisztikus méreteivel összevethetők, vagy annál nagyobbak, $\lambda \geqslant d, r$, a statisztikus leírásmód alkalmazása nem indokolt. A részecskék mozgása gyakorlatilag egymástól független, azaz a részecskék és a falak közötti kölcsönhatás dominál a részecskék egymás közötti kölcsönhatásai mellett.

B — $\lambda < d, r$

Amennyiben teljesül az a feltétel, hogy $\lambda < d, r$, a statisztikus leírás alkalmazása célravezetőbb mint az egy elektronra, vagy elektroncsoportra felírt mozgásegyenlet elemzése. Ebben az esetben, mint arra már utaltunk, az

eloszlási függvény különböző közelítésben megadott szimmetrikus és aszimmetrikus összetevőivel meghatározott közepes random, illetve drift sebességek már magukba foglalják a szabad úthosszak (ütközési frekvenciák) sebességfüggését.

Az átütési jelenségek statisztikus elemzésekor nem indokolt a *B* pontban megadott, az ütközési frekvencia és a külső tér frekvenciájának viszonyától függő osztályozás, ugyanis azok a fizikai megfontolások, amelyek ezt a függetlenrészecskés leírásnál szükségessé tették, már az alapul szolgáló kinetikus egyenlet felírásakor általános formában szerepelnek. Az ω/ν viszony figyelembe vétele ez esetben csupán az általános megoldás sorbafejtéssel történő leegyszerűsítésekor játszik szerepet.

3. Átütési kritériumok

A kisüléseknél kritikus átütési feszültségnek (vagy kritikus átütési térerősségnek) nevezzük a *V—A* karakterisztika azon feszültségértékét, amelynél az első áramugrás jelentkezik. Más szavakkal ez azt jelenti, hogy a kisülési térben jelenlevő kezdeti töltéshordozók a külső tér hatására olyan energiát vesznek fel, hogy újabb töltött részecskéket váltanak ki a semleges gázatomokból. Ez a folyamat lavinaszerűen zajlik le, s áramugrás formájában érzékelhető a *V—A* karakterisztikán.

Egyenáramú esetben az átütés leírását első ízben TOWNSEND [27] adta meg, a töltéshordozók keletkezését és rekombinációját figyelembe vevő részecskemérleg alapján. Egyenletrendszerében az ionizációs, rekombinációs és felületi jelenségeket az egyes gázokra és felületekre jellemző, a kiindulási modell segítségével közvetlenül nem meghatározható tényezőkkel adja meg.

A váltakozóáramú kisülések átütési kritériumának felállításánál, az áttekintésben felsorolt különbségek (pl. egyes esetekben a fali hatások másodlagos volta) miatt nem indokolt az egyenáramú kisülések analógiájára első lépésben kontinuitási egyenletet (részecskemérleget) felírni, s az ott szereplő ionizációs, rekombinációs stb. állandókat külön, az egyenáramú esettől eltérő módon meghatározni, hanem energetikai megfontolásokból célszerű kiindulni. A Townsend-féle modellnél az állandók bevezetését többek között kísérleti úton történő meghatározhatóságuk indokolta. Váltakozóáramú esetben még megfelelő időfelbontás biztosítása mellett is csak ezen paraméterek egyes kombinációi mérhetők.

Az átütési kritérium energetikai megfontolások útján történő meghatározásánál akkor beszélünk átütésről, ha az egyes részecskék vagy részecskecsoportok energiája eléri az ionizálandó gáz, gőz vagy ezek keverékére jellemző ionizációs potenciálnak megfelelő energiát. Attól függően, hogy függetlenrészecskés vagy statisztikus leírást végzünk, az ionizációs küszöb lépcsős

függvénnyel, illetve az ionizációs hatáskeresztmetszet számított, vagy kísérleti úton meghatározott energiafüggésének aproximációjával adható meg.

Az energetikai koncepció alapján felállított átütési kritériumoknál a módszer jellegéből következően csak az alsó határértékével lehet jellemezni a kritikus átütési feszültséget.

Igen nagy nyomásoknál egy harmadik, lényegében az itt bemutatott két közelítés kombinációjának tekinthető diffúziós átütési modelltípus is elkülöníthető. Ennek lényege az, hogy minden egyes töltött részecskének mielőtt rekombinálódna (térfogatban vagy felületeken), legalább egy újabb töltött részecskét kell létrehoznia.

A továbbiakban bemutatunk néhány, az irodalmi hivatkozásokban gyakran szereplő átütési kritériumot, 1.2. pontban megadott ionizációs jelenségcsoportok szerint rendszerezve.

A — $\lambda \gg d, r$

Abban az esetben, amikor a szabad úthosszak összemérhetők a kisülési edény méreteivel, vagy meghaladják azokat, $\lambda \gg d, r$, a kritikus átütési feszültséget (vagy térerősséget) elsősorban a kisülési edény falainak anyaga határozza meg. A töltött részecskék a külső elektromos tér hatására felgyorsulva, meghatározott kinetikus energiára szert téve érnek a falakhoz. Amennyiben a becsapódás pillanatában sebességük egy bizonyos kritikus értéket meghalad, a falból újabb részecskéket váltanak ki. Az ily módon keletkező újabb részecske a tér megfelelő irányánál felgyorsulva további töltött részecskét hoz létre. Ezt az egyszerű sokszorozási mechanizmust véve alapul Backmark és Bengston [28], Gill és von Engel [29], Hatch és Williams [30] és többen mások [31—38] közel azonos átütési kritériumot állítottak fel.

Kiindulási alapként a részecskék sebességét és koordinátáját megadó (6) és (7) egyenlet szolgál. Ahhoz, hogy a $t = 0$ időpillanatban az egyik falról ($x_0 = 0$) elinduló elektron a másik falról legalább egy újabb elektront szabadítson fel, két feltételnek kell teljesülni:

— az elektronoknak az alkalmazott tér egy félperiódusa alatt el kell érni a d távolságra levő szemközti falat, azaz $\omega t = \pi$;

— a becsapódás pillanatában sebességének meg kell haladni egy v_{krit} értéket, amelynél a szekunder emissziót jellemző $\gamma \geqslant 1$ (γ a keletkező szekunder elektronok és a becsapódó elektronok számának viszonya).

Figyelembe véve ezeket a feltételeket, és elvégezve a megfelelő behelyettesítéseket a (6) és (7) egyenletekbe, az átütéshez szükséges E_0 kritikus átütési térerősség és az alkalmazott külső tér $t = 0$ pillanatban vett χ fázisszögének meghatározására szolgáló egyenletek a következő alakban írhatók fel:

$$v = v_0 + \frac{2eE_0}{m\omega} \cos \chi \geqslant v_{krit}, \qquad |\gamma \geqslant 1\text{-nél}| \tag{36}$$

és

$$\omega d = \left(v_0 + \frac{eE_0}{m\omega}\cos\chi\right)\pi + \frac{2eE_0}{m\omega}\sin\chi. \tag{37}$$

Az egyenletek részletekbe menő elemzésével nem foglalkozunk, csak azt jegyezzük meg, hogy megoldásként két kritikus térerősség-érték adódik, amelyek közül átütési kritériumként általában a kisebbet szokták megadni. Az így kapott értékeknek kísérleti eredményekkel való összevetését mind a külső elektródos, mind pedig a belül elhelyezett fém elektródok között kialakuló kisülésnél több szerző elvégezte [29, 30]. A kísérleti úton kapott eredmények a két kritikus térerősség által meghatározott sávban helyezkedtek el, a γ értékének helyes, visszakorrigálással történő megválasztásakor. A γ értékének közvetlen meghatározása rendkívül nehéz, mivel nagyságát a felület pillanatnyi állapota nagymértékben befolyásolja. A szekunder jelenségek részletes elemzésével nem kívánunk foglalkozni, ezzel kapcsolatban igen széles körű áttekintést ad a [39] értekezés.

B — $\lambda < d, r$

Közepes vagy nagy nyomáson, ahol $\lambda < d, r$, az ütközési frekvencia és a külső tér frekvenciájának viszonyától függően számos közelítő átütési kritérium ismeretes.

B.1 — $\omega < \nu$

B.1.1 — $\omega < v_d/d$

A *B.1.1* feltételeket kielégítő körülmények között, a HOLSTEIN [40] által felállított diffúziós elmélet tekinthető a legáltalánosabbnak. A kiindulásként szolgáló átütési kritérium úgy fogalmazható meg, hogy minden egyes szabad elektronnak, a kisülésből történő kilépése előtt legalább egy újabb szabad elektront kell létrehoznia. Más szavakkal ez azt jelenti, hogy az új szabad elektronok ionizáció útján történő keletkezésének sebessége megegyezik, vagy nagyobb az elektronok diffúzió útján történő eltávozásának sebességével.

Ez a feltétel a következő részecskemérleg segítségével adható meg

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = Q + \nu_i n_e \quad D_e \frac{\partial^2 n_e}{\partial x^2}, \tag{38}$$

ahol

D_e — az elektronok diffúziós tényezője,
ν_i — az ionizációt eredményező ütközések száma,
Q — valamely állandó külső ionizációs forrás által egységnyi idő alatt létrehozott elektron-ion párok száma.

Az ionizációs folyamatot lassúnak feltételezve ($\partial n_e/\partial t = 0$), továbbá a feladatot két, egymástól d távolságra levő végtelen síklap között az

$$n_e|_{x=\pm d/2} = 0$$

határfeltétellel megoldva, az elektronkoncentrációra az alábbi kifejezés adódik:

$$n_e = \frac{\frac{4}{\pi} Q \cos \frac{\pi x}{d}}{D_e \left(\frac{\pi}{d}\right)^2 \nu_i}. \tag{39}$$

Az elektronkoncentráció a külső ionizációs forrástól függetlenül végtelen nagyságú lehet (létrejön az átütés), amennyiben az alábbi feltétel teljesül:

$$D_e \left(\frac{\pi}{d}\right)^2 = \nu_i. \tag{40}$$

Az ionizációt eredményező ütközések számát az egyenáramú esetre felírt Townsend-féle modell analógiájára a

$$\nu_i = \alpha v_d \tag{41}$$

képlettel fejezhetjük ki,

ahol

α — az első Townsend-féle ionizációs tényező,
v_d pedig a (8) formula által meghatározott drift sebesség.

Holstein a (40) összefüggéssel jellemzett átütési kritériumot a már korábban tárgyalt egyenáramú analógia bevezetésével fejtette ki. Az ionizációs ütközések számát a (8), (15) és (41) képletek alapján, az ütközési frekvencia mellett mindenhol elhanyagolva a külső tér frekvenciáját, s figyelembe véve, hogy az ütközési frekvencia

$$\nu = \frac{v_r}{\lambda_e},$$

az alábbi alakban kapta meg [40]:

$$\nu_i = \alpha \frac{e}{m} \frac{\lambda_e}{v_r} E, \tag{42}$$

ahol

v_r — a közepes random sebesség,
E — a váltakozóáramú külső térerősségnek megfelelő ekvivalens egyenáramú térerősség a (15) alapján.

A D_e diffúziós tényezőt $D_e = \lambda_e v_r/3$-nak véve, s az elektronok random sebességéről az elektronhőmérsékletre áttérve, az átütési kritérium az alábbi végleges alakot ölti:

$$(pd)^2 = \frac{\pi^2 kT_e}{e\left(\frac{E}{p}\right)\left(\frac{\alpha}{p}\right)} . \tag{43}$$

A kifejezésben szereplő E/p, α/p és T_e értékek az egyenáramú analógiát feltételezve számíthatók, illetve az analógiának [12, 13] megfelelő egyenáramú kisülésben mérhetők.

Az itt megadott átütési kritérium kísérleti ellenőrzése során [41—44] bebizonyosodott, hogy ez az egyszerű modell helyesen adja meg a görbék menetét, azonban az egybeesés mértéke igen erősen függ a közölt paraméterek számítási, illetve mérési módszerétől. Az elméleti értékektől való nagyobb eltérés csak olyan esetben várható, ahol az ambipoláris diffúzió már számottevő szerepet játszik [44, 42], ez esetben ugyanis a kritikus átütési térerősség már nagymértékben függ a kezdeti elektronkoncentrációtól.

B.1.2 — $\omega \ll v_d/d$

Az átütést megelőző folyamatok csoportosításában szereplő *B.1.2* pontnak megfelelő körülményekre Fuchs és munkatársai egy, a szekunder jelenségeket is figyelembe vevő modellt dolgoztak ki [45—48]. Átütési kritériumként az alábbi empirikus kifejezést adták meg [45]:

$$\gamma_i\left[e^{\alpha d}\cos\frac{2\pi\tau}{T} - 1\right] = \gamma_i\left[e^{\alpha d}\cos\frac{\omega d}{v_d^+} - 1\right] = 1 , \tag{44}$$

ahol

α — a Townsend-féle primer ionizációs tényező,
γ — a Townsend-féle szekunder ionizációs tényező.
τ — az ionok átfutási ideje ($\tau \ll T$),
T — a külső tér periódusideje,
d — az elektródok közötti távolság,
v_d^+ — a pozitív ionok drift sebessége.

Ez az átütési kritérium, az egyenáramú esetre felírt Townsend-kritérium formális kiterjesztéseként tekinthető, $\omega = 0$ esetében átmegy abba. A modell kísérleti eredményekkel való összevetése alapján [46, 49] megállapítható, hogy igen alacsony frekvenciáknál, $\omega \ll v_d^+/d$ a teljes egyenáramú analógia alkalmazásához képest továbblépést jelent. Ezzel a modellel nem kívánunk részletesebben foglalkozni, hiszen a vele kapcsolatos diszkussziók az egyenáramú átütési kritériumok részletes elemzéséhez vezetnének, s ez nem képezi a jelen dolgozat tárgyát. A fenti kritérium érvényességi körével kapcsolatban mindössze egy megjegyzést kívánunk tenni. A (44)-es kritériumból jól látható,

hogy amennyiben az ionok átfutási ideje a külső tér félperiódusidejével összevethető, a kritérium értelmét veszíti. Ez azzal magyarázható, hogy az említett esetben a pozitív ionok és a falak közötti kölcsönhatás megszűnik, azaz az ionok csak eljutnak a falig, azonban azzal már szekunder emissziót eredményező kölcsönhatásba nem lépnek, s ez esetben az átütési kritérium megadásához már más modellt kell választanunk [26].

B.2 — $\omega \geqslant \nu$

A csoportosítás *B.2* pontjának megfelelő esetben, vagyis ha $\omega \geqslant \nu$, amint azt már az előzőekben említettük, az átütési kritérium felállításánál eltekinthetünk a falak hatásától, s az edényméretek helyett áttérhetünk a szabad úthosszra, mint karakterisztikus méretre.

Erre az esetre HALE [50] állított fel egy igen egyszerű, azonban THOMSON kísérleti eredményeit [51] minőségileg jól magyarázó átütési kritériumot.

A kritérium lényege abban áll, hogy az elektronoknak az ütközési frekvencia által megszabott szabad úthossz végére a tértől akkora energiát kell felvenniök, hogy azok rendelkezzenek a semleges gázatomok ionizációjához szükséges energiával.

A kritériumot a (6) és (7) egyenletek alapján a következő formában írhatjuk fel:

$$\frac{eE_0}{m}\frac{T}{2\pi}\left[\cos 2\pi\frac{\tau}{T} - \cos\frac{2\pi(t-\tau)}{T}\right] = \left(2\frac{e}{m}U_i\right)^{1/2}, \tag{45}$$

és

$$\frac{eE_0}{m}\frac{T}{2\pi}\left[(t-\tau)\cos 2\pi\frac{\tau}{T} - \frac{T}{2\pi}\sin 2\pi\frac{t-\tau}{T}\right] = \lambda_e, \tag{46}$$

ahol

T — a periódusidő,
τ a szabad elektron megjelenésének pillanata,
t a τ időpillanattól az elektron ütközéséig eltelt idő,
λ_e — az elektronok szabad úthossza,
U_i — a semleges gázatomok ionizációs potenciálja.

HALE a (45) és (46) egyenleteket elemezve arra a következtetésre jutott, hogy az E_0 értéke akkor minimális, ha a szabad elektron megjelenésének pillanatában a külső tér fázisszöge 0, illetve π.

Az átütési kritérium alsó határ jellegét figyelembe véve, ez esetben a (45) és (46) egyenlet a következő egyszerűbb alakot ölti:

$$\frac{eE_0}{m\omega}(1-\cos\omega t) = \left(2\frac{e}{m}U_i\right)^{1/2}, \tag{47}$$

és

$$\frac{eE_0}{m\omega}(t-\omega\sin 2\omega t) = \lambda_e. \tag{48}$$

A fenti transzcendens egyenletekből egyértelműen meghatározható az E_0 kritikus átütési térerősség a gáznyomás (a nyomásfüggés a λ_e változásán keresztül jelentkezik) és a külső tér frekvenciájának függvényében. Az egyenletek elemzése alapján megállapítható, hogy mindkét paraméter esetében a kritikus átütési térerősség az egyenáramú Paschen-féle görbékhez hasonlóan, minimum jelleggel bír. Természetesen ez a modell sem veszi figyelembe a szabad úthosszak sebesség-, illetve energiafüggését, s így az elméleti számítások és kísérleti eredmények jó egyezése csak azoknál a gázoknál várható, ahol a szabad úthosszak közel állandóknak tekinthetők. Az átütési kritérium alsó határ jellegét illetően megjegyezzük, hogy a kritikus átütési térerősség csökkenésével egyre kisebb lesz a kísérletileg meghatározott pontok szórása, az átütési feszültség meghatározásánál. Ennek a magyarázata, mint arra már az átütési jelenségek diszkussziójánál is kitértünk, kézenfekvő. Ugyanis minél kisebb az irányított, drift sebességösszetevő a random sebességhez viszonyítva, annál jobb közelítésben tekinthetünk el statisztikus értelemben a részecske előéletétől, azaz a v_0 kezdeti sebességtől, s ezáltal közelebb jutunk az ilyen szempontból idealizált (47) és (48) egyenletekhez.

B.3 — $\omega \gg \nu$

Igen nagy frekvenciák esetében, $\omega \gg \nu$, a kisülési tér geometriájának befolyása, valamint a kölcsönhatások sokrétűsége miatt nehéz a konkrét feladatoktól elvonatkoztatott általános érvényű átütési kritériumok felállítása. A töltött részecskékre két ütközés között a külső téren kívül saját elektromos és mágneses terük is hat. Ez esetben a koncentráció növekedése már nem egy gyors lavinaszerű folyamat — nem jellemezhető meredek ugrásfüggvénnyel —, hanem a külső tér több periódusa alatt fokozatosan megy végbe, ily módon az általunk meghatározott átütési kritérium helyett egy kritikus felépülési időt [52, 53] kell figyelembe venni. E felépülési időnek a külső tér függvényében való változását legáltalánosabban MARGENAU és HARTMAN [52, 53], valamint POSIN [54] elemezte, a nagyfrekvenciás plazma statisztikus leírásából kiindulva. Az átütési kritériumok ilyen jellegű elméleti értelmezésével és kísérleti vizsgálatával a hullámvezetőkben kialakuló plazmák esetében több közlemény is foglalkozik [55—58].

A leíráshoz tett feltételezések, valamint a kísérleti körülmények erősen eltérőek, ami az eredmények összegző értékelését kizárja.

IRODALOM

1. JOSHI, S. S.- DESMUKH, G. S.: *Nature*, **147** (1941), 806.
2. JOSHI, S. S.—DEO, P. G.: *Nature*, **151** (1943), 561.
3. JOSHI, S. S.— DEO, P. G.: *Nature*, **153** (1944), 434.
4. DEO, P. G.: *Proc. Indian Acad. Sci.*, **A19** (1944), 117.
5. JOSHI, S. S.: *Nature*, **154** (1944), 147.

6. HARRIES, W. L.—VON ENGEL, A.: *Proc. Phys. Soc.*, (London), **A222** (1954), 490.
7. HARRIES, W. L.—VON ENGEL, A.: *Proc. Phys. Soc.* (London) **B64** (1951), 951.
8. BHATAWDEKAR, M. G.: Doctoral dissertation, University of Rajputana Jaipur, Rajasthan, India (1957).
9. LOEB, L. B.—EL-BAKKAL, J. M.: *Fifth International Conference on Ionization Phenomena in Gases*, Münich, I., (1961), 734.
10. EL-BAKKAL, J. M.—LOEB, L. B.: *J. of Applied Phys.*, **133** N° 4 (1962), 1567.
11. GÁCS I.—SZIGETI GY.—ROTTER L.—SZABÓ J.: Magyar Szabadalom, N° **134** 181.
12. TOWNSEND, J. S.—GILL, E. W. B.: *Phil. Mag.*, **26** (1938) 290.
13. BROWN, S. C.: *Proc. Instn. Radio Engres.*, **39** (1951), 1493.
14. LANGEVIN, P.: *Ann. Chim. Phys.*, **8** (1905), 238.
15. LORENTZ, G. A.: Teorija elektronov, GTTI, M-L., (1934).
16. MORSE, P. M.—ALLIS, W. P.—LAMAR: *L. Phys. Rev.*, **48** (1935), 412.
17. DAVIDOV, B. I.: *ZSETF*, **6** (1936), 463.
18. DAVIDOV, B. I.: *ZSETF*, **7** (1937), 1064.
19. DRUYVESTEYN, M.: *Physica*, **3** (1936), 65.
20. SMITH, J. A.: *Physica*, **3** (1937), 543.
21. DRUYVESTEYN, M.: *Physica*, **10** (1930), 69.
22. CRAVATH, A. M.: *Phys. Rev.*, **46** (1934), 332.
23. LANDAU, L. D.: *Sow, Phys.*, **10** (1936), 154.
24. ORNSTEIN, L. S.—BRINKMAN, H.—HAMADA, T.: *Proc. Acad., Amsterdam*, **39** (1936), 315.
25. ALLEN, H. W.: *Phys. Rew.*, **52** (1937), 707.
26. BITÓ, J. F.—ANTAL, K. G.: *Acta Physica Hung.*, **30/1** (1970), 23.
27. TOWNSEND, J. S.: Theory of Ionization of Gases by Collosion, Oxford 1915.
28. ALFVÉN, H.—COHN-PETERS, J. J. (Quoting results of BACKMARK, N. E.—BENGSTON, V.): *Ark. Mat. Astr. Fys.*, **31** (1944).
29. GILL, E. W.—VON ENGEL, A.: *Proc. Roy. Soc.*, **A192** (1948), 446.
30. HATCH, A. J.—WILLIAMS, H. B.: *J. Appl. Phys.*, **25** (1954), 417.
31. KREBS, K.—MEERBACH, H.: *Ann. Phys.*, **15** (1955), 189.
32. HIBER, E. L.—OZAKI, H. T.—KLEIDER, A.: *Ninth Gaseous Electronics Conference*, Pittsburgh.
33. KOSEL, F.—KREBS, K.: *Z. Phys.*, **139** (1954), 189.
34. HATCH, A. J.—WILLIAMS, H. B.: *Phys. Rev.*, **89** (1953), 339.
35. HATCH, A. J.—WILLIAMS, H. B.: *Phys. Rev.*, **100** (1955), 1228.
36. TAMAGAWA, H.: *E. T. J.*, Tokyo, **3** (1957), 42.
37. HATCH, A. J.—WILLIAMS, H. B.: *Phys. Rev.*, **79** (1958), 681.
38. HOOVER, C. W.—SMITHERS, R. K.: *Phys. Rev.*, **98** (1955), 1149.
39. BOLLA, I.: Doktori értekezés (1971).
40. HOLSTEIN, T.: *Phys. Rev.*, **70** (1946), 367.
41. COOPER, R. J.: *Instn. Elect. Engrs.*, **94/III**, (1947), 315.
42. POSIN, D. Q.: *Phys. Rev.*, **73** (1948), 496.
43. FRANCIS, G. D.: Phil. Thesis, University of Oxford (1951).
44. PROWSE, W. A.—LANE, P. E.: *Appl. Sci. Res.*, Hague, **B5** (1955), 127.
45. FUCHS, W.: *Z. Phys.*, **103** (1936), 709.
46. FUCHS, W.: *Appl. Sci. Res.*, Hague. **B5** (1955).
47. FUCHS, W.—GRAF, L.—MUES, G.—MÜLLER, H. G.: *Z. Phys.*, **145** (1956), 1.
48. FUCHS, W.: *Proceedings of the Third International Conference on Ionization Phenomena in Gases*, Venice (1957).
49. VLAARDINGERBROEK, M. T.: *Appl. Sci. Res.*, Hague, **B5** (1955), 139.
50. HALE, D. H.: *Phys. Rev.*, **73** (1948), 1046.
51. THOMSON, J. J.: *Phil. Mag.*, **23**, (1937), 1.
52. MARGENAU, H.—HARTMAN, I. M.: *Phys. Rev.*, **73** (1948), 297, 309, 316, 326.
53. MARGENAU, H.—HARTMAN, I. M.: *Phys. Rev.*, **74** (1948), 706.
54. POSIN, D. Q.: *Phys. Rev.*, **73** (1948), 498.
55. HERLIN, M. A.—BROWN, S. C.: *Phys. Rev.*, **74** (1948), 291, 910, 1650.
56. MCDONALD, A. D.—BROWN, S. C.: *Phys. Rev.*, **75** (1948), 411, 1324.
57. MCDONALD, A. D.—BROWN, S. C.: *Phys. Rev.*, **76** (1949), 1634.
58. BROWN, S. C.—MCDONALD, A. D.: *Phys. Rev.*, **76** (1949), 1629.
59. ANTAL, K. G.: Doktori értekezés (1971).

On the Building-up of Capacitive Discharges. The phenomena in the building-up of capacitive discharges are reviewed and classified. The better known descriptions based on the theory of independent particles and statistics used so far are shown, pointing out the range of validity and the limitations of the approximations used. By critical evaluation of the models and the breakdown criteria, the field of application of these methods and the possibilities for refinements are characterized.

Über den Aufbau von kapazitiven Entladugen. Im Aufsatz werden die Vorgänge bei der Ausbildung von kapazitiven Entladungen überblickt und systematisiert. Die bisher angewendeten, verbreiteteren Beschreibungen mit Hilfe von unabhängigen Teilchen und Statistik werden, unter Hinweis auf den Geltungsbereich und die Anwendungsgrenzen der benützten Näherungen, besprochen. Durch Auswertung der Modelle für die Ausbildung und der Durchschlagskriterien werden der Anwendungsbereich dieser Methoden und die Möglichkeiten für ihre Verfeinerung charakterisiert.

A VÁROSÉPÍTÉS TUDOMÁNYOS MŰVELÉSE

HELYZETKÉP*

FARAGÓ KÁLMÁN[1]
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK DOKTORA

GRANASZTÓI PÁL[2]
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK DOKTORA

PREISICH GÁBOR[3]
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK DOKTORA

és

PONGRÁCZ PÁL[4]

[Beérkezett: 1972. május 31]

A városépítési tárgyú kutatás témaválasztásában mindig figyelembe vette a gyakorlati szükségleteket és tágította érdeklődési körét olyan művelési irányokban is, amelyek a követelmények, társadalmi igények, funkciók szempontjából alapozhatják meg a műszaki megoldásokat. Széles körű kutatási tevékenység irányult a lakóterületek alakításának, a városközpont-problematikának, a városépítészeti esztétika kérdéseinek tisztázására: ehhez képest elmaradás van a városszerkezetre és az ipari területekre vonatkozó kutatásokban. Az eredményekben elsődleges a tervezési szemlélet, és ez szabja meg a kutatási módszereket is, amelyek folyamatosan korszerűsödtek a tudományterület fejlődése és a művelés szervezeti keretei által meghatározott lehetőségeken belül. A jelenlegi helyzet felmérése és értékelése lehetőséget adott a tudományterület fejlődését elősegítő főbb teendők meghatározására, főleg az eddig kellő figyelemben nem részesült témák, a kutatási módszerek választékának bővítése, a káderutánpótlás és a szervezeti formák kívánatos alakulása tekintetében.

Azok a kutatások, amelyek a városépítési tevékenység elméleti megalapozását célozzák, a hazai településtudomány legrégebben és az utóbbi időkig legszélesebb körűen művelt részét képezik. Ennek oka az, hogy a településtudomány fejlődésének eredete nálunk is — mint sok más országban — a városépítés műszaki problémáinak gyakorlati megoldásában, ismeretei rendszerezésében, oktatásában mutatható ki, ugyanakkor a városépítés mint építési, építészeti, tehát műszaki tevékenység az, amelyben a településtudományi felismerések, törekvések általában és maradandóan érvényesülnek, társadalmi értelemben leginkább érzékelhetővé és értékelhetővé válnak.

A viszonylag régebbi és széles körű művelés eredményeképpen a kutatott témák száma igen nagy, és az elmúlt időszakban elvégzett kutatások jegyzékét vizsgálva, alig lehet találni a tématerületen belül olyan szektort, amelyet valamilyen formában figyelemre ne méltattak volna. Így látszólag naprakész állapotban van a városépítési tevékenység tudományos háttere, sőt bizonyos részleteiben nem is egyszeresen. A témák jelentős része ugyanis — nem lényegesen eltérő kutatási céllal és tartalommal — több alkalommal is mint újabb kutatás napirendre került, aminek megvannak a tudományág sajátosságaiból

* Ezt a helyzetképet — amelynek lezárása 1971 végén történt — az MTA Településtudományi Bizottsága 1972. április 6-i ülésén megvitatta és jóváhagyta.

[1]Prof. Dr. Faragó Kálmán, Budapest, V., Néphadsereg u. 28. [2]Dr. Granasztói Pál, Budapest, VI., Gorkij fasor 38. [3]Dr. Preisich Gábor, Budapest, II., Pasaréti út 97. [4]Dr. Pongrácz Pál, Budapest, V., Beloiannisz u. 2–4.

fakadó, valamint szervezeti-adminisztratív jellegű okai; ezekre később még kitérünk.

A kiküldött bizottságnak kiindulásul a vizsgált tudományterület körülhatárolását kellett elvégeznie, mégpedig nem általános érvénnyel a településtudomány belső tagozódásának megállapítása érdekében, hanem jelen tanulmány kidolgozásának célszerűségi szempontjai alapján. A településtudományi kutatásoknak azt a szektorát tekintettük idetartozónak, amelynek témái jellegzetesen a városok építési-rendezési folyamataihoz kapcsolódnak. Hasonlóképpen dönteni kellett a „művelés" témánk szempontjából való értelmezéséről. A helyzetkép lehető teljességére törekedve, kiterjeszkedtünk a témaválasztásra, a kutatás módszereire, hozzáférhető formában nyilvánosságra került eredményeire, azok gyakorlati hasznosítására, a kutatási tevékenység szervezeti kereteire. A feltárás lehetőséget adott a további fejlődés meggyorsítása érdekében szükséges legfontosabb teendők felismerésére; ezekre — mintegy az anyag összefoglalásaképpen — indokoltnak tartottuk befejezésül rámutatni.

1. A kutatások témái

Kiemelendőnek tartjuk, hogy a témaválasztást — akkor is, amikor ezt nem előzetesen megállapított terv szabályozta és akkor is, amikor hosszabb-rövidebb időszakra szóló kutatási tervek készültek — nagyfokú realitás jellemezte. A kutatás mindig érzékenyen és rugalmasan reagált azokra a gyakorlati munkában észlelt problémákra, amelyek tisztázása elméleti megalapozást kívánt, és ezeknek a témáknak a kidolgozását napirendre tűzte. A gyakorlat szükségleteinek ez a gyors felismerése egyik oldalról igen előnyös vonása a kutatási tevékenységnek, másik oldalról azonban időnként kapkodáshoz, felesleges aktualizáláshoz vezetett és gátolta egyes témákban az elmélyülést.

A témaválasztást a gyakorlati követelmények mellett a tudományterület belső fejlődése is befolyásolta, ami elsősorban annak tágulásában nyilvánult meg. Ennek következményeképpen egyrészt megnőtt a városépítés szűkebb körét meghaladó kutatások, publikációk száma és aránya, másrészt a szorosabban vett városépítési célú kutatások is igen gyakran közelítik meg tárgyukat fontos, de kívülebb eső szempontokból. Példaként az újabb városépítéstörténeti, egészségügyi, gazdasági hatékonysági, városszociológiai, igazgatási szempontokra utalunk, valamint azokra a kutatásokra, amelyek a városépítés, -fejlesztés ügyét a tágabb, sőt országos településhálózati, regionális, illetve területfejlesztési keretekbe helyezve tárgyalják.

A tágulás konkrét megnyilvánulási formájának tekinthetők azok az újonnan kibontakozott művelési irányok, amelyek kevésbé műszakiak, inkább a városépítés egészének vagy jelentős részének a követelmények, a társadalmi igények, a funkciók szempontjából való megvizsgálását célozzák, éppen a

műszaki megoldások kellőbb megalapozása végett. Ennek a főként alapkutatásokkal kapcsolatos művelésnek fokozott jelentőséget ad az, hogy városépítésünk újabb feladatai, problémái a szocialista társadalmi-gazdasági átalakulással, az ebből is eredő fokozódó urbanizációval szorosan összefüggnek, és e folyamat törvényszerűségeinek, következményeinek ismerete nélkül nem érhetnénk el megalapozott és maradandó műszaki eredményeket. Kiemelhetők e téren a városépítési kutatások kereteiben folyt és még folyó szociológiai vizsgálatok, továbbá „A szocialista társadalom életformáinak hatása a települések fejlesztésére" témájú, az MTA Településtudományi Bizottsága és a Magyar Urbanisztikai Társaság által rendezett konferencia anyagai.

Jelentősek továbbá a megalapozás szempontjából a városépítéstörténeti és velük kapcsolatosan a műemlékekre vonatkozó vizsgálódások, amelyek nagy részét könyvsorozat keretében és önállóan megjelent városmonográfiákban, tudományos közleményekben publikálták. Ugyancsak alapkutatási jelleggel törekedtek feltárni az egészségügyi és a városépítési szempontok összefüggéseit, továbbá a városépítési műveletek gazdasági hatékonysága elméleti kérdéseit. Kutatások folytak a városgazdálkodás és városépítés összefüggéseinek a tisztázására, ha nem is minden esetben városépítési, de ahhoz szorosan kapcsolódó jelentős műszaki, szervezési, szolgáltatási problémákat érintve.

A szorosabban vett városépítési, egyben műszaki témák közül elsősorban a városi közlekedéssel kapcsolatos jelentős kutatásokat, publikációkat kell kiemelnünk. Legtöbbjük átfogó jellegű közlekedéstudományi művek részeként jelent meg. Megjegyzendő, hogy a városi közlekedés problémáinak, vizsgálatuknak kezdettől lényeges szerepe volt a városépítés mind gyakorlati, mind tudományos művelésében, s ennek jelentősége újabban még csak növekedett, amit számos kutatás, publikáció tanúsít. A városépítés és a közlekedéstudomány közötti kölcsönhatások előmozdítását — számos más publikáción kívül — szolgálta a VÁTI-ban több éven át folyt, de publikálásra még nem került kutatás is a közlekedés és a településfejlesztés kölcsönhatásaiból származó településfejlesztési igények tárgyában. Még inkább a szorosabban vett városépítés műszaki művelésébe tartozik a közművekkel kapcsolatos témák kutatása. Ez a közelebbi múltban — részben KGST keretekben is — igen nagy erőráfordításokkal folyt. Ki kell emelni közülük a közműfajtáknak és közműrendszereknek a településekre és a beépítési módokra való befolyása témájában folytatott kutatást, valamint a települések infrastrukturális állóeszközállományára vonatkozó adatfeldolgozást. E témák jelentősége az urbanizáció növekedésével, a vidéki városok fejlődésével, a tervszerű városépítés követelményeinek fokozódásával szintén nagy mértékben növekedett. Hasonlóan speciális művelési terület, de alapvető jelentőségű és ezért már régóta a városépítésbe beletartozó az ún. zöldfelületek kialakításának (zöldterülettervezés, kerttervezés) ügye. Jelentősége újabban egyrészt a környezetvédelem fokozódó igényével, másrészt a városok egészségügyi, levegőszennyeződési,

zajártalmaival való összefüggései miatt ugyancsak növekedett. Több ezzel kapcsolatos kutatás, publikáció mellett — a városépítés közlekedési vonatkozásaihoz hasonlatosan — a legfontosabb tudományos eredmények átfogó kerttervezési szakkönyvekben találhatók meg azok részeként vagy utalás formájában.

E szakági munkák — mint a már említett közlekedési, közművesítési, zöldterületi témakörökben is — elhatárolási kérdéseket vetnek fel, nevezetesen hogy mikor, milyen vonatkozásokban városépítési jellegűek és mikor merőben szakágiak. Ezeknek az elhatárolási kérdéseknek a megoldását megkönnyítették olyan közelmúltban folyt tudományelméleti vizsgálódások, munkák, amelyek általában a településtudomány és ezen belül a városépítés helyzetét, kapcsolatait más tudományokkal törekedtek tisztázni. Az ilyen elhatárolási problémák ugyanis nemcsak a műszaki tudományok és a városépítés tudományos művelése átfedéseiben, hanem más tudományok — így a szociológia, a gazdaságföldrajz, a szervezés- és igazgatástudomány, a történettudomány stb. — vonatkozásaiban is felmerültek és tisztázást igényeltek. Gyakorlati jelentőségük többek közt az, hogy a városépítés művelése során elkerülhető olyan ismeretek kutatása, amelyeknek feltárása más tudományágak feladata.

Átfedések tapasztalhatók az egyik legfontosabb és legidőszerűbb műszaki témakörben, a korszerű iparosított tömeges építés és a városépítés kapcsolataiban is. Az építéstechnika mikénti alkalmazása és érvényesülése a városépítésben — különösen a lakáshiány, az ezzel összefüggésben kezdeményezett házgyári termelés folytán — az új városrészek kialakításában, használatában, további fejlődésében, városképében egyaránt kifejezésre jutó, feszítő erejű problematika. E téren többféle kutatás is folyt; kiemelésre érdemes az MTA Településtudományi Bizottsága és a Magyar Urbanisztikai Társaság rendezésében 1971 februárjában tartott „A városépítés és az építéstechnika kölcsönhatásai" című konferencia anyaga. A problematika és egyben az átfedések lényegét az építéstechnikai kérdések megoldásában a városépítés átfogóbb szempontjainak érvényesítése, ugyanakkor a városépítésnek az építéstechnikai feltételekhez való szükségszerű illeszkedése, ezek mértéke, korlátai, lehetőségei, kölcsönhatásai jellemzik.

A városépítés művelését meghatározott szempontokból szolgáló kutatások közül olyanokra, amelyek magának a kutatásnak a módszereit hivatottak tisztázni és továbbfejleszteni, inkább csak a közeli múltban került sor, noha a tudományág művelése, egyben eredményeinek gyakorlati felhasználhatósága szempontjából igen nagy jelentőségűek. A korábbi, hagyományos módszerek ugyanis a feladatok bonyolódása, növekedése során nem bizonyultak kielégítőnek. Fejlődtek a statisztikai feldolgozás módszerei; mindinkább előtérbe kerültek a prognosztika — a távlatok, az előreláthatóság, az előrebecslés — problémái és vizsgálatuk; fokozódott a jelentősége a megvalósult állapotok

kritikai értékelésének. Az említett vonatkozásokban említésre méltó kezdeményezések és hasznosítható kutatási eredmények segítik a közvetlen városépítési témák kidolgozását, de még nem eredményeztek lényegbevágó változást a kutatások módszereiben. Ide sorolhatók továbbá azok a kutatások, amelyek a városépítési műveletek gazdasági hatékonysága átfogó problematikájában és mérésének módszerei tárgyában, továbbá a matematikai módszerek városépítési feladatokra való alkalmazási lehetőségeinek tisztázására folytak.

Végül — bár e témának a tudományos művelésbe tartozása vitatott — megemlítendő az a folyamatos, az előzők állandó továbbfejlesztését célzó tevékenység, amely az ún. tervezési metodikai munkák, kiadványok, előírások kidolgozására irányult, a városrendezési tervek (általános és részletes rendezési tervek) tartalmának, készítési módszereinek lehető korszerű szinten tartására. E munka nagy gyakorlati jelentőségét részben a városok fokozódó tervellátási szükséglete, részben az a körülmény indokolja, hogy a várostervezés decentralizálása folytán mind több vidéki, helyi szerv foglalkozik ilyen tervek készítésével.

A közvetlen városépítési témák között gyakorlati hasznukhoz és a szemléletet megalapozó jelentőségükhöz képest viszonylag kis számban szerepelnek azok, amelyek a város egészére vonatkoznak. Az e tekintetben fennálló elméleti megalapozatlanságot az is mutatja, hogy a jelenleg érvényben levő „Tervezési irányelvek és mutatószámok" c. kiadványban egyetlen fejezet foglalkozik a településszerkezettel; ez is elsősorban fogalmakat tartalmaz és nem az egész település, hanem a lakóterület szerkezetének kialakítására vonatkozólag állapít meg irányelveket.

Lényegesen nagyobb érdeklődés mutatkozott azok iránt a témák iránt, amelyek átfogóan vagy egyes részleteikben a város fő részeivel kapcsolatosak. Mindenekelőtt a lakóterületek alakításának különféle kérdései szerepelnek igen sok kutatásban, publikációban, és a közelebbi múltban jelentős fejlődésen mentek át, amit az eredményeknek a különféle normatívákban, szabályzatokban, tankönyvekben való leszűrődése is tanúsít. Kiemelendők a korábbi kutatások, publikációk közül a légtérarányok, a napfénybesugárzás kérdésének elmélyült vizsgálata, valamint a lakóterületen belüli közintézményellátás kutatása, az ezeket ismertető publikációk. Legutóbb pedig a lakóterületi egységek szervezési elveivel kapcsolatos kutatások, amelyekben figyelemre méltó módon érzékelhető a városépítés témái és különösen a lakóegységek alakítása korábbi statikus szemléletének átváltása az időbeli, a fokozatos fejlődést figyelembe vevő rugalmasabb, dinamikusabb szemléletbe. A lakóterületek vonatkozásában további figyelemre méltó szemléleti és művelési változást tükröz az a tény, hogy míg korábban e téma inkább új városok, városrészek létesítésére korlátozódott, addig újabban mindinkább a meglevők rekonstrukciója felé fordul, amit több publikáció is tanúsít. Ezzel együtt vizsgálódás tárgyát képezték a lakóterületi szanálással kapcsolatos problémák, módszerek. A lakó-

területek témájának különleges jelentőséget ad egyfelől a lakásüggyel, a lakásépítés műszaki feladataival mint feszítő társadalmi problémával való szoros kapcsolata, másfelől hogy komplexen egybefoglal számos témát, elsősorban a közlekedés, a közművek, közintézmények, tehát a kommunális ellátás vonatkozásaiban.

Újabb keletű, de fontosságban növekvő kutatások foglalkoznak az ipari területek alakításával, általában véve az ipari üzemeknek a városban való mikénti elhelyezésével, kapcsolataival. E téren a városi ipari területek városszerkezeti jelentőségével, méretezésével és rekonstrukciójával, majd az ipari parkok kialakításával kapcsolatos kutatások emelendők ki. Jelentős továbbá „A városfejlesztés és iparfejlesztés összefüggései" című, az MTA Településtudományi Bizottsága és a Magyar Urbanisztikai Társaság által rendezett konferencia közzétett anyaga számos városépítési vonatkozásával. Ezek ellenére az ipari területek, az ipari üzemek városépítési problémáinak feltárására a közelebbi múltban távolról sem került olyan mértékben sor, mint a lakóterületek esetében, és mint amit a téma gyakorlati jelentősége igényelne.

A városrészek közül mint egyik legjelentősebb, a városközpont az, amelynek a kutatása a közelebbi múltban jelentős eredményeket ért el, mind általában, mind a hazai történeti városközpontok különleges vonatkozásaiban. Ugyancsak kiemelkedően gazdag a városközpont-problematikával kapcsolatos publikációs tevékenység, amelynek eredményeképpen ebben a témában értékes könyvek, átfogó jellegű tanulmányok jelentek meg. Speciális és igen lényeges része a témának a történeti városközpontok vizsgálata és rekonstrukciója. Ez szorosan kapcsolódik a műemlékvédelem ügyéhez; a történeti városközpont, a városmag területileg is gyakran egybeesik a törvényesen védett ún. műemléki jelentőségű területekkel. A városrendezés, városépítés és a műemlékvédelem tehát leginkább a városközpontok témájában igényli a közös művelést, módszereket, főként az értékelés tekintetében.

Ehhez kapcsolódóan említendő a városépítés esztétikai oldala, amit közkeletűvé vált kifejezéssel városépítészetnek, illetve városépítészeti esztétikának lehet nevezni. Lényegében a város alakításának, formai hatásainak, ezek értékelésének témája. Újabb művelésének alapvető jellegzetessége, hogy csaknem valamennyi eddig felsorolt műszaki és egyéb, a városépítést meghatározó témához, tényezőhöz kapcsolódva, azok összességének mint tartalomnak az alapján foglalkozik e tartalmat kifejező formai kialakítással, a városképekkel, a városképi megjelenés problémáival. Ezek mind a külsőbb új városrészekben, mind a történeti városmagokban gyakran kerülnek a társadalmi érdeklődés előterébe, társadalmi hatóerejük kétségtelen, és ez is indokolja behatóbb elemzésüket. Ki kell emelni az e témakörben elért eredményeket ismertető magas színvonalú publikációkat, amelyek tudományos értékük mellett, jellegüknél fogva gyakran a tudományterület szélesebb körben való ismertté tételét is szolgálják.

Mindezek az itt felsorolt kutatások, művek túlnyomóan valamennyi városunkra érvényesen foglalkoznak a városépítéssel. Budapest főváros azonban mégis külön helyet és különleges szerepet tölt be a városépítés tudományos művelése terén is. Egyfelől méretei, jelentősége, a városépítés művelésében gyakran példaadó szerepe miatt, másfelől mert saját tervező és egyben kutatószervvel is rendelkezik, ahol a közelebbi múltban az itt említett témák közül igen sokra — így pl. szanálási, egészségügyi, zöldterületi, metodikai témákra, lakóterületek szervezésére, alakítására, a laksűrűségre stb. — vonatkozó kutatások folytak a főváros számára. A főváros általános rendezési tervét is, mely sok éven át, igen alapos előmunkálatok, vizsgálatok sorozatai alapján készült és kormányzati jóváhagyást nyert, jórészében tudományos értékű munkának lehet tekinteni, mely egy adott átfogó és jelentős konkrét cél érdekében magas nívón szintetizálja sokféle részkutatás eredményeit.

2. A kutatás módszerei

Áttekintve a városépítési tárgyú kutatások témáit, igazoltnak látszik a művelés széles körű voltára vonatkozó korábbi állításunk. Az elvégzett munka mennyiségi oldalának értékeléséhez azt is figyelembe kell venni, hogy — mint ezt szintén korábban említettük — a témák egy része több alkalommal is kutatás tárgya volt. A többszöri feldolgozás nem mindig eredményezte az ismeretek szélességének és mélységének növekedését. Inkább az újrafeldolgozás időpontjában érvényes szemléleti és egyéb keretekbe való beillesztésre, vagy éppen a kutatási megbízás által felvetett követelmények kielégítésére fordítva a fő gondot, esetenként nem következett be a korábbi kutatási eredmények lényegbeli továbbfejlesztése, újabb alapvető szempontok felvetése és ezek következményeinek mélyebb elemzése. Ez azzal is magyarázható, hogy a kutatási feladatok gyakran túlságosan átfogóak, a rendelkezésre álló kutatási kapacitás és átfutási idő nem ad lehetőséget a szükséges elmélyülésre, emiatt egyes esetekben a megismételt kutatás során tulajdonképpen a mélységnek és szélességnek csak megközelítően ugyanarra a fokára lehetett eljutni, mint az előző alkalommal.

Hozzájárult ehhez az is, hogy az újabb feldolgozás legtöbbször bizonyos előkészítő munkák, feltárások, vizsgálatok stb. újból való elvégzésének kényszerével is járt. A kiindulási adatok változékonysága és a társtudományok vonatkozó anyagainak, állásfoglalásainak hiánya, változásai miatt ugyanis a megalapozás munkáját legalább részben újra el kell végezni. Megjegyzendő, hogy a szakterületünkön folyó kutatás — amikor csak lehetősége van rá — elég fogékony a társ- és határos tudományok eredményeinek és az érintkező szakágazatok elhatározásainak átvételére. Ez előnyös a gyakorlati tevékeny-

ség szempontjából, mert lehetőséget ad az aktuális követelményekhez való alkalmazkodásra, illetve ezek kielégítésére. Elméleti előrehaladás szempontjából azonban bizonyos esetekben hátrányokkal jár. Így például éveken keresztül komoly nehézségeket okozott a szakágazatok tudományos megalapozásának hiánya olyan fontos témában, mint a közintézményellátás, vagy pedig kellően át nem gondolt elhatározásokhoz vezetett, mint pl. a nagytávlatú közlekedésfejlesztés szempontjainak átvétele és beépítése a másféle távlatra meghatározott városépítési fejlesztési elvek közé.

Az a tény, hogy a legtöbb témában pillanatnyilag nincs lehetőség objektív és kevesebb változásnak kitett megalapozásra, oda vezet, hogy a kutatás módszerei az évek folyamán nem fejlődtek a szükséges mértékben. Így főleg kísérleti, módszeresen gyűjtött tapasztalati anyagok hiányában még mindig nem küszöbölhető ki a problémák spekulatív megközelítése, vagyis hogy a kutató korlátozott egyéni tapasztalatai, a szakirodalomból és más módon megszerzett ismeretei alapján igyekszik meghatározni és igazolni újabb ismereteket, irányelveket, követelményeket. A kutatási módszerek lényegi változatlansága valószínűleg összefügg akutatások s zámára nyújtott keretekkel is, azzal ti., hogy az elmúlt évek folyamán változó szervezeti formák között lényegében mindig magányos kutatók, esetleg kutatópárok dolgoztak egészen minimális asszisztenciával az egyes témákon.

A kutatások témájában, értelmezésében és ennek megfelelően azok eredményeiben is elsődleges a tervezési szemlélet, vagyis a városépítési kutatások többségükben a megtervezett állapot előállításához szükséges elmélet megfogalmazását célozzák. Lényegesen kevesebb érdeklődés fordul a tervezési munkákat megalapozó programok kidolgozásához szükséges elméleti vonatkozások kimunkálására. Ugyancsak kevés figyelmet fordítanak a megvalósítás műveleteivel kapcsolatos problémák kutatására, valamint a megvalósításnak mint időbeli folyamatnak a vizsgálatára, a megvalósítás folyamán előálló feladatok körvonalazására és megoldásuk helyes megközelítésének módjára. Ilymódon a programadás és a megvalósítás közötti közbülső munkafázisra, a tervezésre összpontosul a figyelem, aminek többféle oka is van.

Már a szakemberképzésben, az egyetemi oktatásban is elsődleges a tervezési szemlélet, az elméleti és gyakorlati foglalkozások egyaránt tervezési feladatok megoldására készítenek elő. Ezzel összefüggésben, de a szakterület fejlődésének sajátosságaiból következően is a kutatásban résztvevők többsége korábban városépítési tervezéssel foglalkozott vagy ma is részben azzal foglalkozik. A leglényegesebb ok pedig talán az, hogy a kutatásokat leggyakrabban azáltal hasznosítják, hogy a hatósági előírások, kötelező tervezési irányelvek, normatívák megszerkesztésében veszik alapul. Gyakran már a kutatási megbízásban ez a hasznosítási mód és célkitűzés szerepel, de ha nem így van, akkor is a kutató munkájának eredményességét így mérik le, holott a hasznosításra sokféle más formában szintén sor kerülhet.

A tervezési szemlélet a kutatásban a legutóbbi időben még inkább megerősödött a kísérleti tervezésnek mint kutatási módszernek az alkalmazásával. Önmagában ez gazdagítja a kutatási megközelítések választékát, bár egyelőre a felhasználás módja még nem látszik eléggé tisztázottnak. Az elméleti-kísérleti tervek készítése mellett a kutatásnak a legszorosabb együttműködésben kellene folynia a tényleges gyakorlati tervezéssel. Ez a kapcsolat nem teljesen kielégítő, annak ellenére, hogy a tervezés és a kutatás legnagyobb része ugyanazon intézmény keretein belül bonyolódik le. A tervelemzések, a tervváltozatok fejlődése, a tervezett és megvalósított állapot viszonya, a tervezési szándék és lehetőség összhangja és ellentmondása stb. tekintetében bőséges tapasztalatok gyűltek össze, de ezek nem érvényesülnek kellőképpen még a tervezési célzatú kutatásokban sem. A gyakorlati tervezéssel való kapcsolat másik lehetőségét is elhanyagolja egyelőre a kutatás. Nem rendszerezték és így nem is hasznosítják azt a hatalmas adatanyagot, amelyet a különböző tervekhez készített vizsgálatok tartalmaznak. Ezek a vizsgálatok pedig lényegében feltárták a magyar városoknak mindazokat az adottságait, amelyek a városépítési tevékenységet megalapozó témák kiindulása számára jelentőséggel bírnak.

A hazai viszonyok komplex feltárása és a feladatok szempontjából való szisztematikus értékelése — értve ezen a kialakult helyzetnek, a kialakulás folyamatának és különösen a közelmúlt városépítési gyakorlatának elemzését — tudományterületünkön különösen kiemelendő jelentőségű. Míg a legtöbb műszaki tudományban fokozódóan érvényesül az indokolt törekvés a külföldön már elért eredmények felhasználására és ezzel felesleges kutatások elkerülésére, a városépítés esetében erre viszonylag kevesebb a lehetőség, a feladatoknak erősen helyhez, éghajlathoz, hagyományokhoz, társadalmi jellegzetességekhez stb. kötött volta miatt. Helyesebben: a külföldi — főként a számszerű — eredmények adaptálása is mindenképpen kutatási munkát igényel. Nem jelenti ez azonban azt, hogy nem lett volna a nemzetközi információk, publikációk, eredmények esetében egyre fontosabb az azokról való szervezett tájékozódás, tájékoztatás. Ez egyfelől a KGST-együttműködés révén, másfelől ha mindeddig nem is kielégítő mértékben, a dokumentációs munkák, szervezetek útján főként az ötvenes évek végétől kezdve növekvő arányban folyt. A szakirodalmi tevékenységnek is jelentős részét teszik a külföldi, mind szocialista, mind más országok eredményeit ismertető, értékelő közlemények. A nemzetközi tájékozódást megkönnyítette még a mindinkább intézményes részvétel a városépítés számos nemzetközi szervezetében, sőt azok konferenciáinak több ízben Magyarországon való megtartása. Így csak példaként, a szocialista országok tudományos akadémiáinak konferenciája 1962-ben Budapesten a történeti városközpontok reorganizációja, 1970-ben pedig az ENSZ-EGB budapest szimpoziuma a városrekonstrukció témakörében.

Meg kell jegyezni ezzel kapcsolatosan, hogy a hazai viszonyok és a külföldi tudományos eredmények elemzésében, feldolgozásában fennálló két-

ségtelen hiányok azért éreztetik kevésbé hatásukat, mert a kutatási tevékenységben általánosan jellemző a reális szemlélet. A feladatok felfogásában, a kutatási eredményekben megfigyelhető a törekvés a városaink jelenlegi helyzete, a városépítési tevékenység társadalmi-gazdasági keretei által nyújtott lehetőségekhez való alkalmazkodásra. Ennek is tudható be, hogy a hazai városépítési tárgyú kutatásokban eddig nem bukkantak fel olyan, valóságtól elszakadt utópiaszerű eszmefuttatások, amilyenek más országok irodalmában szinte megszokottá váltak. Mind a témaválasztásban, mind a feldolgozásban megnyilvánuló realitás a kutatási tevékenység elsőrendűen fontos jellegzetességének tekinthető.

3. A művelés szervezeti keretei

A tudományterületnek az előzőkben körvonalazott tartalmi, tematikai helyzetében és a kutatás jellemző módszereiben felismerhető problémák, jelenségek jórésze tükrözi a művelés szervezeti keretei által nyújtott mindenkori lehetőségeket.

Meghatározó jelentőségűnek tekinthető a művelés szempontjából, hogy az a közeli múltig mondhatni kizárólag műszaki, ezen belül is az építés, építésügy körébe tartozó intézményeknél folyt. Mégpedig egyfelől a Budapesti Műszaki Egyetem Városépítési Tanszékén, másfelől az Építésügyi és Városfejlesztési Minisztérium keretein belül, a felügyelete alá tartozó tervező szerveknél, elsősorban az 1953-ban e célra szervezett Városépítési Tervező Vállalatnál (VÁTI), fővárosi vonatkozásban pedig a Budapesti Városépítési Tervező Vállalatnál (BUVÁTI), újabban esetenként az Építésgazdasági és Szervezési Intézetnél (ÉGSZI). Néhány jelentős téma került legutóbb feldolgozásra az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottságnál is. Mindezek a munkálatok — az OMFB és az MTA által támogatott néhány téma kivételével — túlnyomóan az építésügyi tárca, esetenként más szervek (OT, helyi tanácsok stb.) által biztosított pénzügyi fedezetből folytak, eleinte néhány százezer forintos, később már millió forintos nagyságrendű kutatási hitelekből, még a városépítési kutatásokra korlátozott értelemben is. A szervezetnek és a finanszírozásnak ez a módja magyarázza, hogy a tudományos művelés, kutatás kezdetben a közvetlen, elsősorban a várostervezés és az építésügyi igazgatás körében való gyakorlati felhasználásra szánt műszaki fejlesztési munkálatok — szabályzatok, metodikák, normatívák stb. — kidolgozására irányult, és csak később nyílt lehetőség az alkalmazott és — a tudományterület szempontjából — alapkutatások végzésére is. Ez utóbbiakat hátráltatta a költségvetési keret hiánya és ennek folytán a vállalati termelési, elszámolási rendszerbe szorított kutatás. Éppen ezért alapkutatások eleinte leginkább a BME Városépítési Tanszékén folytak akadémiai célhiteltámogatásból, továbbá egyéni munkákként (kandidátusi, doktori értekezések stb.). Elősegítették és hosszabb szünet után újra

elősegítik az alapkutatásokat a KGST keretében nemzetközi együttműködéssel folyó munkák, amelyekben a hazai fél gyakran jelentős szerepet vállalt.

Ezzel összefüggésben is rá kell mutatni a tudományos művelés legfőbb szervezeti korlátjára, ti. hogy míg külföldön, s éppen pl. a KGST tagállamokban a városépítés tudományos művelésének nem egyszer jelentős létszámú kutatót foglalkoztató intézményei vannak — így pl. az NDK-ban a Deutsche Bauakademie keretében, a Szovjetunióban, Lengyelországban, Bulgáriában pedig önálló kutató intézetek — addig Magyarországon ilyen ez ideig nincs. Kivéve azt az adott viszonyaink között jelentős körülményt, hogy az Építésügyi és Városfejlesztési Minisztérium elhatározása folytán 1965-ben az addigi Városépítési Tervező Vállalat — a vállalati gazdálkodás megtartásával — Városépítési Tudományos és Tervező Intézetté alakult, és keretében önálló településtudományi kutatóiroda létesült. A településtudomány és ezen belül a városépítés bázisintézeteként való működésére, főként a kutatások koordinálására irányuló törekvések azonban, ami az Intézet létesítésének egyik célja volt, a téma sokfelé tartozása, szervezési nehézségek folytán eddig kevés eredményre vezettek. Ettől függetlenül, a jelen helyzetben elvileg helyesnek látszik az a törekvés, hogy a kutatás zöme olyan intézmény keretében folyjék, melyben a gyakorlati és az elméleti, a tervezési és tudományos művelés egyesíthető, kölcsönhatása biztosítható. Ami a többi kutatóhelyet illeti, a BUVÁTI-ban kezdettől máig csak néhány fő foglalkozik kutatással, a Városépítési Tanszéken sem lényegesen több és általában az oktatással egyidejűen (az ötvenes években a tanszéken néhány évig, akadémiai státusú kutatókból álló kutatócsoport működött, de ez létszám hiánya miatt már korábban megszűnt).

Ezek a körülmények, továbbá a közelebbi múltban történt gyakori szervezeti változások, nem kevésbé a kutatásnak jórészt vállalati gazdálkodási keretekben folyó volta miatt nehezen alakulnak ki a kutatásirányításnak, a kutatások módszeres végzésének, dokumentálásának, megvitatásának és publikálásának más tudományágaknál régebbi hagyományok alapján már kijegecesedett módszerei. Ugyanígy nehézkes a kutatók képzése, fejlődése, utánpótlása, annál is inkább, mert a felsőfokú oktatás kutatásra nem képez, és a téma tudományos művelésében általában nem is bizonyult hasznosnak — egy-egy kivételtől eltekintve — a gyakorlati tapasztalatokat nélkülöző fiatal kutatóknak nyomban kutatási munkára irányítása. Talán ezzel is magyarázható az az elfogadhatatlan helyzet, hogy tudomásunk szerint csupán egy fő vesz részt szervezett aspirantúrán. Az utánpótlás különleges nehézségeit mutatja, hogy az önálló kutatásra, kutatócsoportok vezetésére alkalmas személyek szinte kivétel nélkül a magasabb korosztályokba tartoznak, és ugyancsak magas a tudományos minősítéssel rendelkezők átlag-életkora is.

Ha a káderhelyzet problémáin nem is, a szervezeti keretekből származó egyes nehézségeken könnyítettek egyfelől a tudományterületnek a közelebbi múltban alakult tudományos szervei, a tudományos fokozatok megszerzésé-

vel kapcsolatos értekezések, viták, valamint a publikációs lehetőségek, amelyek a településtudomány tágabb körén belül — a keretek, az eredet folytán is — sok esetben adtak alkalmat a városépítés témaköre tudományos művelésére, elméleti problémái tisztázására, túlnyomóan az MTA, ezen belül a Műszaki Tudományok Osztálya keretében. Ezáltal jellemzővévé vált a szervezeti megoszlásban és a művelésben egyfelől az építésügyi szerveknek vállalati alapon történő, pénzügyileg egyre bővebben dotált, részben alapkutatási célzatú, részben a napi gyakorlatot szolgáló kutatási működése, másfelől az Akadémia által nyújtott, pénzügyileg szerény keretekben, inkább társadalmi jelleggel a tudományág, közelebbről a városépítési téma átfogóbb, elméletibb művelése. Az akadémiai keretek, lehetőségek közül megemlítendő elsősorban az 1951-ben alakult és máig folyamatosan működő Településtudományi Bizottságnak a tudományterület fejlődését szolgáló rendezvényei, továbbá mint publikációs lehetőség az Építés- és Közlekedéstudományi Közlemények, újabban az *Építés-Építészettudomány* nevű akadémiai folyóirat. Jelentős publikációs és szervezeti keretnek tekinthető a városépítés tudományos művelése szempontjából is a Magyar Urbanisztikai Társaság, gyakran együttműködve a Településtudományi Bizottsággal, különösképpen pedig a Társaság kiadványa, a *Településtudományi Közlemények* című, 1952 óta időszakosan megjelenő tanulmánygyűjtemény.

A szervezeti keretek problémájához tartozik a kutatási tervek ügye, szerepe. Az ötvenes évek végén az országos távlati tudományos kutatási tervben a településtudománynak külön ún. főfeladat (22., majd 60. számú) jutott, s ezen belül szép számban szerepeltek szorosabban vett városépítési vonatkozású témák. A terv a városépítési kutatások tekintetében — mint egyébként is — sokat kívánt egyszerre megvalósítani, kellő kutatási bázis nélkül, engedve a tudományos művelés akkor feszítő tágulási törekvéseinek, sok elmaradt kutatás pótlási igényének. A VÁTI-nak már említett tudományos intézményként való átalakulásával egyidőben, 1965-ben új, koncentráltabb távlati, ezen belül ötéves kutatási terv készült az egész tudományterület számára, újabb kutatásszervezési alapokon, egyik fő célkitűzésként a lényegében városépítési, nevezetesen a városrekonstrukciós feladatoknak alapkutatásokkal való alátámasztását jelölve meg. E tervidőszak végére, a közelmúltban történt szervezeti, szemléleti változásokkal is összefüggésben megint újabb, az addigiaktól eltérő távlati kutatási koncepciók körvonalai bontakoznak ki. Ezekben a városépítés hagyományos és jórészt műszaki feladatai mellett, részben rovásukra fokozódóan tért nyernek általános területfejlesztési, közgazdasági jellegű kutatások.

A kutatás tervszerűségére való törekvés — a vázolt egyenetlenségek, váltakozások ellenére is — eddig mindenképpen elősegítette a városépítés témáinak művelését. Ez egyrészt a megnövekedett kutatási bázis, kutatási költségfedezetek révén vált lehetségessé, másrészt azáltal is, hogy 1966-ban

— elsőízben — elvégezték a tudományterület eddigi művelésének módszeres és részletes feltérképezését, a művelési hiányok meghatározásával. Ennek ellenére meg kell állapítani, hogy a tervszerű és megnövekedett volumenű művelés nem hozott eddig a városépítés témái szempontjából a beléje fektetett munkával, költségekkel arányos, közvetlenül érzékelhető eredményeket, bár az utóbbi évek munkájának következményeképpen kétségtelen szemléletátalakulás történt, és nem hagyható figyelmen kívül az sem, hogy a szerteágazó kutatásokban még igen sok fel nem használt eredmény fekszik, összesítésre, megfelelő publikációra várva. A mérhető eredmények egyrészt szervezési okokból (a kutatószervek együttműködésének hiányosságai, túladminisztráltság, vállalati tervteljesítési kötelezettségek, váltakozó kutatásirányítási szempontok stb.), másrészt a káderhelyzet említett korlátai, utánpótlási nehézségek miatt, főként pedig a kutatásoknak a tervek ellenére fokozódó tematikai szétszóródásával, túl sok kutatás egyidejű megkezdésével magyarázhatóan maradnak el a várakozástól. Alkalmas kutatók hiányában ugyanis nem minden, egyébként elvileg helyesen előirányzott téma talált megfelelő feldolgozásra, más kutatók viszont egyéni munkájukkal — így pl. a tudományos fokozatok megszerzésére irányuló értekezésekkel — dolgozták ki azt, amihez felkészültségük leginkább megvolt. Nem egyszer mennyiségi törekvések jelentkeztek, és ezek folytán a kutatások eredményei vaskos kötetekben a tervtárba kerültek, de a köztudatban és a gyakorlatban kevéssé szívódtak fel. Ezek az itt csak érintett jelenségek a tervszerű kutatás egy még le nem küzdött veszélyére, a formális eredmények helyenkénti előtérbe kerülésére mutatnak, a városépítés szűkebb tudományterületét illetően is. Talán ezzel is függ össze az a jelenség, hogy a végzett kutatások nagy mennyiségéhez viszonyítva kevés a publikáltak, helyesebben a publikálásra érdemesek száma, és ezek egy része nem is kutatási tervből ered, hanem a már említett egyéni munkák gyümölcse. Viszont a publikált kutatásokon — többek közt a szakterületnek éppen a közelebbi időszakban örvendetesen megszaporodott könyvalakú publikációin — lehet mégis leginkább lemérni, a kezdeti nehézségek ellenére is, a jelentős előrehaladást.

4. A tudományterület fejlesztésének főbb teendői

A városépítés tudományos művelésének helyzetét felmérve, az alábbiakban vázlatosan felsoroljuk a bizottság által különösen lényegesnek ítélt fejlesztési feladatokat:

— A városépítés tudományos művelésében az elmúlt időszakban elért eredményeket csak akkor lehet elmélyíteni és fejleszteni, ha a tudományterület továbbra is jelentőségének megfelelő figyelemben részesül. Biztosítani kell a szükséges kereteket, lehetőségeket és eszközöket mind az eddigi kutatási tevékenységgel megszerzett ismeretek folyamatos korszerűsítéséhez, mind az újonnan jelentkező kutatási témákkal és feladatokkal kapcsolatos munkák

megindításához. Ennek érdekében több évre szóló kutatási koncepciótervezet kidolgozása szükséges, melynek — a kutatóhelyek és hitelfedezetek főhatósági hovatartozásától függetlenül — össze kell hangolnia a településtudományra, ezen belül a városépítésre vonatkozó kutatások teljes területét.

— A városépítési tárgyú kutatásokat különösen előtérbe helyezi az a körülmény, hogy a társadalom mindinkább felismeri a környezetalakítás problémáinak fontosságát. E kérdések megoldási lehetőségei szorosan összefüggnek a tudományosan megalapozott városépítéssel. Az eddigi kutatások ebből a szempontból való hasznosítására és a környezetalakítással kapcsolatos új kutatási feladatok megoldására különös gondot kell fordítani.

— Figyelemmel a kutatás anyagi és személyi feltételeinek korlátozott voltára, a kutatási feladatokat a társadalmi igényeknek és megoldásuk fontosságának, sürgősségének megfelelően súlyozni és programozni kell. Mindenekelőtt olyan munkákra kell a figyelmet összpontosítani, amelyeknek kutatásával más tudományágak nem foglalkoznak és amelyekre vonatkozó külföldi eredmények nem vagy csak nehezen adaptálhatók hazai viszonyokra. Figyelembe kell venni a már elkészült kutatásokat, ezek szükséges kiegészítését, továbbfejlesztését.

— A városépítési tudományos kutatások mai fázisában az alapkutatások szisztematikus végzése és folytatása elengedhetetlen. Ennek bázisára kell támaszkodniuk a közvetlen gyakorlati célt szolgáló alkalmazott kutatásoknak.

— A kutatómunkában az eddiginél nagyobb súllyal kell szerepelnie a város egészére, valamint a város és környéke összefüggéseire és kapcsolataira vonatkozó kutatásoknak. A város egyes részelemeivel foglalkozó kutatásoknak ezekbe a keretekbe kell illeszkedniük. Figyelemmel kell lenni arra, hogy a kutatásnak a tervezés mellett a végrehajtás és az üzemeltetés problémáival is megfelelő mértékben foglakoznia kell.

— A városépítés eredményeként keletkező létesítmények, azok elhelyezése, elrendezése és kapcsolatai sok évtizedre megkötik a települések működését és arculatát. Ezért a kutatásoknak a távlati feladatok vizsgálatából, illetve figyelembevételéből kell kiindulniuk. Ugyanakkor az eddiginél nagyobb súllyal foglalkozniuk kell a folyamatos megvalósulás és továbbfejlődés lehetőségeivel, műszaki és gazdasági problémáival.

— Lehetőségig korszerű és egzakt módszereket kell kidolgozni a különböző városépítési koncepciók egymással való összehasonlítására, figyelembevéve az összhatékonyság, a gazdaságosság, a folyamatos megvalósíthatóság és „nyitottság" (variálhatóság, változtathatóság) igényeit.

— Alapvető fontosságú a városépítési tervezés és kutatás módszereinek állandó fejlesztése a hazai és külföldi kutatások eredményeinek beépítésével. Szükséges ebben a vonatkozásban is a matematikai programozás, a kibernetika lehetőségeinek felhasználása, a városépítési adatok összegyűjtésére és tárolására vonatkozó módszerek kidolgozása.

— A városépítési normatívák állandóan továbbfejlesztendők a tudományos kutatások eredményeinek felhasználásával. Ehhez más tudományágak városépítéssel kapcsolatos határterületeinek (pl. városegészségügy, városi közlekedés, városszociológia) tudományos eredményeit fel kell használni. Az arányos fejlődés érdekében a normatívák fontossági és időrendi koordinálása alapvető fontosságú.

— A városépítési kutatások eredményességének előfeltétele a kutatásra alkalmas szakemberek számának növelése, ilyenek képzése. Lehetővé kell tenni nagyobb feladatok megoldásához különböző munkahelyekről kiválasztott szakemberekből alkalomszerűen összeállított kutató teamek, kutatócsoportok felállítását, illetve igénybevételét. Tovább kell fejleszteni a Városépítési Tudományos és Tervező Intézet városépítési kutatással foglalkozó részlegeit. A Budapesti Műszaki Egyetem Városépítési Tanszékén megfelelő státusok biztosításával lehetővé kell tenni a folyamatos tudományos kutatást. Ugyancsak biztosítani kell a tudományos igényű városépítési kutatásokat — a nagyváros különleges problémáira való tekintettel — a Főváros tervező vállalatánál.

— Mindezeknek a feladatoknak a megvalósítása érdekében biztosítani kell a megfelelő tudományos káder utánpótlást. E cél érdekében el kell mélyíteni a Budapesti Műszaki Egyetemen a városépítési szakosítást, és élni kell a szakemberek korszerű továbbképzésének minden lehetséges formájával. Elő kell segíteni a városépítési tárgyú aspirantúrát, növelni kell a tudományos jellegű publikációk lehetőségét. Biztosítani kell a kutatási anyagok gyűjtését, korszerű tárolását, a szakembereknek ezekre vonatkozó tájékoztatását.

Urban Studies: A Survey of Research Activity. Urban research, in selecting its subject matter has always taken into account the requirements of practice, and extended its fields of interest towards trends which could form the basis of physical planning and design from the viewpoint of general requirements, social needs and functions. A widespread investigation has been exercised in order to clarify the design problems of residential areas, town centres and the problems of civic design, whereas research of problems of urban structure and industrial areas, is somewhat lagging behind. The results of studies are primarily planning oriented, so are research methods, which have been continuously updated as facilitated by the development of the discipline and by the institutional framework of research activity. The survey and evaluation of current situation gives the possibility of defining the main tasks of fostering the advancement of this field of science, in the first line as regards the promotion of themes neglected so far, extension of the choice of research methods, training of new generation, and the evolution of research organization.

Wissenschaftliche Pflege des Städtebaues. Die wissenschaftliche Erforschung des Städtebaues hat im Auswahl ihrer Themen die praktischen Anforderungen stets berücksichtigt und den Interessenkreis auch in Richtungen erweitert, wo die technischen Lösungen durch die Gesichtspunkte der sozialen Anforderungen, Ansprüche und durch die Funktionen begründet wurden. Weitreichende Forschungsarbeit wurde der Anordnung von Wohngebieten, der Klarstellung der Probleme des Stadtzentrums und der Städtebauästhetik gewidmet; in diesem Zusammen-

hang zeigt sich jedoch ein gewisses Zurückbleiben in der Erforschungen der Probleme der Stadtstruktur und Industriegebiete. In den Ergebnissen kommt hauptsächlich die Planungsanschauung zur Geltung und diese bestimmt auch die Forschungsmethoden, die innerhalb der Möglichkeiten der Entwicklung dieses Wissenszweiges und im Rahmen der Forschungsorganisation ständig modernisiert wurden. Die Abwägung und Abschätzung der gegenwärtigen Situation ermöglichten die Bestimmung der wichtigsten Aufgaben, die die Evolution dieser Disziplin vor allem im Zusammenhang mit den Themen, die bisher in Hinsicht der Erweiterung der Forschungsmethoden, der Kaderschulung und der Ausbildung neuer Organisationsformen nicht an der erforderlichen Beachtung teilhaftig wurden, begünstigen.

MELEGEN DOLGOZÓ SZERSZÁMACÉLOK

KATOR LAJOS*
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

ARTINGER ISTVÁN**
és
CZOBOLY ERNŐ***
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

[Beérkezett 1972. április 28-án]

A szerzők a szerszámgyártás hazai helyzetének elemzéséből indulva ki, rámutatnak a fennforgó hiányosságokra és azok fő okaira. Hangsúlyozzák a korszerű szerszámgyártás szerepét a gazdaságos termelésben. A kérdés fontossága a szakirodalmi közlemények nagy számában is tükröződik. Ezek feldolgozása és rendszerezése világosan kijelöli azokat az irányokat, amelyek a jobb minőségű, olcsóbb és tartósabb szerszámok gyártása érdekében világszerte kialakultak. A szerzők a hazai kísérletek eredményeiről is beszámolnak, és az így szerzett tapasztalatok, valamint a szakirodalom áttekintése alapján javaslatokat tesznek a hazai szerszámanyag kutatásokra.

1. Bevezetés

E tanulmány kidolgozásának célja a hazai melegalakító süllyesztékes kovácsoló, meleghúzó, meleghajlító, présöntő, kokilla, fém és műanyag fröccsöntő egyéb melegalakító szerszámok élettartamának növeléséhez szükséges tényezők feltárása, a szerszám tartósságának fokozását biztosító alapanyagok kijelölése, a szerszámgyártás technológiai lehetőségeinek kutatása és a megoldandó feladatok meghatározása. Ezzel alapot óhajt szolgáltatni a melegen dolgozó szerszámok kutatása terén szükséges döntések meghozatalához és a kapcsolatos intézkedések megtételéhez.

A szerszámgyártási és ellátási helyzet jelen elemzése az alábbi forrásmunkák felhasználásával történt:

1. OMFB 4—322/b-T. „A forgácsmentes szerszámellátás és gyártás távlati fejlesztése" c. tanulmány.
2. VKI. 1968/KGM Y—10609/68. „Meleg és hidegsajtolás, valamint egyéb alakító és öntőszerszámok szerszámanyagainak fejlesztése" c. tanulmány.
3. KGM 4—12458/69. „A hideg- és melegalakító szerszámok acélanyagainak és gyártástechnológiájának fejlesztése" c. tanulmány.

A forgácsnélküli szerszámgyártás fejlesztése népgazdasági érdek, tekintve, hogy gépiparunk csaknem minden ágazata igényel szerszámozást. Az előkészítő munka során megállapítható volt, hogy szerszámgyártásunk

* Dr. Kator Lajos, Budapest II., Csalán u. 17/b.
** Dr. Artinger István, Budapest XI., Vántus K. u. 10.
*** Dr. Czoboly Ernő, Budapest II., Battai u. 5.

elmaradottsága fékezőjévé vált az ipar fejlődésének. Az igények kielégítése sem mennyiségi, sem minőségi vonatkozásban nem volt megfelelő.

Az OMFB 1965-ben készült tanulmánya országos felmérés alapján képet adott a szerszámgyártás helyzetéről. Az alábbiakban közöljük az OMFB 1965. évi 4—322/b-T sz. tanulmányában szereplő, a szerszám szükségletek várható alakulására vonatkozó adatokat:

Igény

Megnevezés	1965		1970		1980	
	edb	mFt	edb	mFt	edb	mFt
Lemezsajtoló	204,5	375,1	299,2	539,3	515,1	1430
Kovácsszerszám	19,3	96,1	38,5	131,8	49,4	306
Öntőszerszám	6,0	22,2	9,9	63,6	19,6	121
Műanyagsajtoló szerszám	17,5	225,6	24,6	20.3	36.0	391

A fenti igények biztosításának feltételét az OMFB tanulmány központi műszaki fejlesztési alapból fedezett 800 300 eFt beruházással, valamint a termelékenység növelését célzó konkrét műszaki-szervezési intézkedésekkel irányozta elő.

A hivatkozott céltanulmányban foglalt távlati elképzelések ma már módosításra szorulnak, mivel azok a központi irányítás légkörében születtek. A különbség a régi és az új elképzelések között a központi irányítási rendszer és az új gazdaságirányítás eltérő szemléletéből adódik.

Az új gazdaságirányítási rendszerben a cél elérését közvetett hatások érvényesülésén keresztül lehet hatékonyan biztosítani, illetőleg a fejlesztési cél meghatározásánál messzemenően figyelembe venni a fejlesztők, a gyártók és a felhasználók anyagi érdekeltségét.

2. A szerszámgyártás általános helyzete

A szerszámüzemek jelentős része korszerűtlen, alacsony fokon szakosított. A vállalati beruházások többnyire csak a mennyiségi hiányokat pótolják, a gyártás műszaki színvonalán alig változtatnak.

A szerszámgyártás üzemszervezési oldalról nézve rendkívül kedvezőtlen. A szerszámok és készülékek előállítása technológiailag bonyolult folyamat. Igényli jóformán valamennyi megmunkálási módot, mind gépi, mind kézi műveletek formájában. Ennek következtében a házi szerszámüzemek szervezői természetszerűleg olyan termelőhely összetételt kényszerülnek létesíteni, melyeknek rossz a kihasználása. Az átlagos műszakszám egy körül van.

A jelenleg alkalmazott gépi és technológiai berendezések általában alacsony színvonalúak. Általában hiányoznak a szerszámgyártás speciális kor-

szerű gépei, mint a másoló-marógépek, szerelő prések, nagypontosságú köszörűk, koordináta fúrógépek, hidegbenyomó gépek, szikraforgácsológépek, edző és csiszoló berendezések, fúró-maróművek, valamint a különféle optikai, mechanikai elven működő műszerek és vizsgáló, beállító berendezések.

A vállalati szerszámüzemek korszerűtlensége, a szakemberhiány, a gyártásban uralkodó szervezetlenség, a technológia színvonalának alacsony foka, a minden áron való tervteljesítés a szerszámgyártást erősen kiszolgáló jellegű segédtevékenységgé tette, mivel a termelési érték és tervteljesítés szempontjából nem bírt közvetlen döntő jelentőséggel.

További szervezési problémát jelent a gyártóeszközökkel és ezen belül a szerszámokkal történő helytelen gazdálkodás. Nagy vállalatok gyáregységei egymás között nem tudják megoldani a sokszor azonos célú szerszámok közös használatát.

A gépipar technológiai fejlesztésének kulcskérdése a gyártóeszközök minőségének javítása és a kellő mennyiség gyártása. Mindkét cél elsősorban a szerszámgyártás műszaki színvonalának emelésével érhető el. A szerszámgyártás alacsony technológiai színvonalának fő okai a szakosítás nem kielégítő mértéke és a nagymérvű decentralizáltság.

Nemzetközi tapasztalatok azt mutatják, hogy a szerszámgyárak és felhasználó vállalatok helyes munkamegosztását kell követnünk. A szerszámgyártásra szakosított vállalatok feladata az egyetemes gyártóeszközök szabványosított elemek közép—nagy-sorozatú gyártása, továbbá a nagy technikai felkészültséget igénylő bonyolult szerszámok kissorozatú, ill. egyedi gyártása. Iparilag fejlett országokban a feldolgozó vállalatok jelentős része saját szerszámgyártó üzemmel nem rendelkezik. A szerszámokat előállító üzemek közül is csak a nagyobbak rendelkeznek egy, vagy néhány speciális szerszámgyártási technológiával, pl. hidegbenyomás, szikraforgácsolás stb., a többi kisebb üzem kooperációban oldja meg ilyen irányú technológiai problémáit.

Hazai viszonylatban is szükség van a mind szélesebb igény kielégítésére, valamint a központi műszaki fejlesztési alap hatékonyabb felhasználása érdekében a fejlesztési célnak legjobban megfelelő rendszer szerinti szakosításra.

A vállalati szerszámüzemekben a vállalat adott technológiája szerinti szakosítás az irányadó szempont, mivel egyfajta technológiai és felszerszámozási feladatot kell végrehajtaniok.

A technológiailag szakosított vállalatok mellett meg kell valósítani a szerszámgyártás olyan centrumait, amelyek a kutatáson, fejlesztésen, különleges technológiák megteremtésén, szabványosításon és az ezekhez kapcsolt magas színvonalú gyártáson keresztül képviselik a szakterület műszaki haladását.

A gépipari termelés szerszámozottságának fokozása, méghozzá alacsonyabb szerszámozási költségeket biztosító nagy hatékonyságú szerszámokkal való ellátása a gépgyártási technológia minden fázisában szükséges.

A kevés ráhagyással készülő alakhű előgyártmányok szerszámai (süllyesztékek, odorok), a nagyteljesítményű hajlító-, kivágó- és műanyag szerszámoknak hosszú élettartammal való szolgáltatása, a szerszámok magasabb ára ellenére a felhasználónál tetemes költségcsökkenést eredményez.

Hazánkban a szerszámozás költségei a gyártási összköltséghez viszonyítva igen nagyok, ami nem annyira a szerszámok költséges voltában jelentkezik, hanem azok rövid élettartama miatti gyakori elhasználódásból származó költségtöbbletből adódik.

A szerszámozás költsége a gyártási összköltség %-ában a gépipar területén néhány országban a következő:

Ország	%
Magyarország	2,4 ÷ 2,6
Szovjetunió	1,0 ÷ 1,1
USA	0.3
NDK	1,5
NSZK	1,0

Fenti táblázat igen kedvezőtlen képet ad a magyar szerszámgyártás költségigényéről. Kétségtelen, hogy a forgácsmentes alakítás szerszámainak gyártása a gépipari átlagnál jóval magasabb szellemi energiát és drágább berendezéseket igényel.

A költségek kedvezőtlen alakulásának okai lehetnek:

— a szerszámgyártás alacsony technológiai színvonala,
— a magasszintű specializáció hiánya (kisfokú termelékenység),
— a szerszámok rövid élettartama — alapanyag és előállítási technológia miatt,
— a szerszámok szakszerűtlen felhasználása, karbantartása és felújítása,
— feldolgozógépek nem kielégítő állapota,
— a feldolgozóipar gyártmányainak kis volumene (sokféle gyártmány — kis sorozat),
— előregyártott szerszámok minimális felhasználása, típuskonstrukciók hiánya,
— a szerszámanyag korszerűtlen minősége és méretválasztéka, előgyártmány technológiák hiánya, pl. köszörült profilidomacélok stb.

A szerszámozási költségtényezőket hazai viszonylatban a gyártásra fordított idő szempontjából vizsgálva megállapítható, hogy az a gépipar teljes munkaidejéhez viszonyítva négyszer nagyobb a műszakilag indokoltnál.

Az összes munkaidő ráfordításból a gyártóeszköz gyártásra fordított idő részarányai:

Ország	%
Magyarország	12 ÷ 14
Szovjetunió	7 ÷ 10
USA	5 ÷ 8
NSZK	3 ÷ 6

Ezek a számok már önmagukban is mutatják, hogy Magyarországon rendkívül túlzott a szerszámgyártásra fordított idő.

A szerszámgyártás költségösszetevőinek elemzésénél az időráfordítás mellett lényeges szerepet játszik a szerszám élettartamát, minőségét meghatározó alapanyag. A hazai szerszámok élettartama 1/3-ára vehető a külföldön

A kivágó-, hajlító-, sajtoló szerszámok exportja éves bontásban tőkés és szocialista viszonylatban

	1965	1966	1967	1968	1969
Tőkés, e$	—	10	11	11	24
Szocialista, eRbl	100	120	150	300	280

Fenti szerszámok exportjának várható fejlődése

	1971	1972	1973	1974	1975
Tőkés, e$	40	48	60	75	100
Szocialista, eRbl	320	330	350	360	370

szokásosnak. Az alakító szerszámok rövid élettartama egyrészt az alapanyagok nem kielégítő, ingadozó minőségének, másrészt a korszerű felületi ötvöző és hőkezelő eljárások ismeretének hiánya, illetve megvalósításuk korlátolt feltételei együttes hatásának tulajdonítható.

A világ 1968. évi szerszám exportja — beleértve a forgácsoló szerszámokat is — 995 millió $ volt. Ebből Magyarország 0,6 millió $-ral részesedett. Ebben a hazai szerszám export értékelésben a forgácsnélküli szerszámok nem képviselnek számottevő részt. (A forgácsnélküli alakító szerszámok exportjára vonatkozó adatok a Külkereskedelmi Minisztériumtól és a Feruniontól kapott információkból származnak.)

Importból évente jelenleg is 15÷20 nagyméretű műanyag fröccs szerszám kerül tőkés országból beszerzésre, kb. 250÷300 ezer $ értékben, mely iránti igény a jövőben növekedni fog. Ezenkívül előfordul még a géppel együtt érkező szerszámok importja, az így beérkező szerszám a gép tartozékaként szerepel, a rendelő vállalat mint import szerszámot nem tartja nyilván.

A szerszámgyártás kiszolgáló jellegéből következik, hogy a mindenkori igények kielégítése a korszerűségi követelményeknek megfelelő színvonalon csak úgy lehetséges, ha a szerszámgyártás rugalmasan tudja elősegíteni a felhasználó iparágak törekvéseit, illetőleg azok fejlődésére nem fejt ki fékező hatást. Ebből következik, hogy a modern szerszámgyártás nem nélkülözheti a műszaki fejlődés várható alakulásában a legjellegzetesebb és valamennyi ágazatra érvényes irányzatok ismeretét.

Megfigyelhető a KGST-n belüli szakosodás, amely elősegíti az integrált gazdasági rendszer kialakítását. Az integráció kedvező hatása feltehetően érvényesülni fog a szerszámgyártás területén is.

A szerszámgyártás egyedi jellegének ellenére érvényesül a gépiparban tapasztalható általános tendencia az előgyártmányok kedvezőbb kialakítása területén, a kevesebb forgácseltávolítás, munkaidő ráfordítás csökkenésével. Termelékenység növelésének alapvető feltétele az előgyártás technológiájának korszerűsítése.

A forgácsolási technológia korszerűsítésére is hatással van a forgácsnélküli alakító technológia, mert a numerikus vezérlésű forgácsoló gépek üzemeléséhez pontosabb, jobb felülettel rendelkező előgyártmányokra van szükség.

3. A meleg süllyesztékacélok fejlesztésének irodalmi áttekintése

A meleg süllyesztékacélok iránti érdeklődés az utóbbi évtizedekben világszerte erősen megnövekedett. Az érdeklődés annak tudható be, hogy nőtt a képlékenyalakítási technológiák aránya a gyártástechnológiában, előtérbe került a nehezen alakítható ötvözetek sajtolása, öntése. Bevezetésre került a nagysebességű alakítási technológia stb., ahol a szerszámok élettartama különösen nagy mértékben befolyásolja a gyártás gazdaságosságát. Maguk a szerszámok általában drága anyagokból készülnek, megmunkálásuk komplikált alakjuk és kemény, szívós anyaguk miatt nehéz. A szerszámok meghibásodása, komoly kieséseket jelenthet a termelésben, kisebb hibák pedig pontatlan, selejtes gyártmányok előállítását okozhatják.

A meleg süllyesztékacélok igénybevétele igen összetett:

A matrica mechanikai igénybevétele nagy szilárdságot, folyási határt és szívósságot követel az acéltól.

Az alakító üreg felülete koptató hatásnak, termikus fáradásnak és hő okozta lágyító hatásnak van kitéve.

A meleg süllyesztékacélokkal szemben támasztott követelmények:

nagy szilárdság: $\sigma_{0,2} = 135 \div 165$ kp/mm²,
nagy szívósság: KCU $= 2 \div 5{,}5$ mkp/cm²,
jó átedzhetőség,
nagy kopásállóság, megeresztésállóság,
melegszilárdság:

	500 °C-ig	600 °C-ig	650 °C-ig
σ_B kp/mm²	110 ÷ 130	100	90

nagy ellenállás termikus kifáradással szemben; jó hővezetőképesség,
kis hőtágulási együttható.

Pl. néhány konkrét szerszámnál a megkívánt keménység értéke az I. táblázatban látható.

I. táblázat

		HB kp/mm²
Nagyméretű szerszámok kalapácsokhoz	(>6 t)	300÷340
Közepes méretű szerszámok kalapácsokhoz	(3÷6 t)	320÷360
Közepes méretű szerszámok kalapácsokhoz	(1÷3 t)	360÷390
Kis szerszámok kalapácsokhoz		375÷415
Betétek, kalapácsokhoz, présekhez		390÷450
Szerszámok vékony, lapos, gyorsan hűlő darabokhoz		500÷515
Lyukasztó tüskék		430÷500
Nagysebességű alakító szerszámok		420÷500

A meleg süllyesztékek élettartama döntően az acél melegszilárdságától, megeresztésállóságától, termikus kifáradással szembeni ellenállásától függ.

Az acélok ezen tulajdonságai W, Mo, Cr, V, Si ötvözéssel növelhetők, ha a C tartalom 0,3÷0,45% között van. Az első négy ötvöző karbidjai hőkezeléskor a szokásosnál (A_{c_3} + 50÷100 °C) nagyobb (A_{c_3} + 200÷300 °C) hőmérsékleten oldatba vihetők, és edzéssel erősen ötvözött martenzit hozható létre. Megeresztéskor az ötvözők karbidjai diszperz alakban szegregáltathatók. Mivel lassabban koagulálnak, mint az Fe_3C (cementit), alkalmasak kiválásos keményedésre. Azonban a kiválásos keményedés adott hőmérséklet—idő tartományában a szívósság rendszerint csökken. Ezért meg kell találni az olyan megeresztési hőmérséklet—idő összetartozó értékeket, amelyeknél a keménység és szilárdság mellett a szívósság is maximális.

A meleg süllyesztékacélok C-tartalma csak ritkán esik a 0,45÷0,6% határok közé. Az ilyen acélokban ui. mind több cementit típusú karbid jelenik már meg, amely már alacsonyabb hőmérsékleten koagulál (kisebb lesz a melegszilárdság).

A W és Mo erősen növeli az acél melegszilárdságát. A W-tartalom az ilyen acélokban max. 12%-ban engedhető meg, mert csökkenti a hővezetőképességet, növeli a karbideloszlás heterogenitását és ezzel erősen rontja az acél szívósságát (termikus kifáradással szembeni ellenállását).

A Mo-nel ötvözött acélokban kisebb hőmérsékleten jelentkezik a kiválásos keményedés; karbidjai gyorsabban koagulálnak, és szívósabb lesz az acél.

A V növeli a melegszilárdságot, gátolja az acél szemcsedurvulását, azonkívül nagyban elősegíti a kiválásos keményedést, viszont csökkenti a szívósságot. Ezért max. 1÷2%-ban fordul elő az ilyen típusú acélokban.

A Cr és a Si növeli az acél kis alakváltozásokkal szembeni ellenállását, folyási határát 400÷550 °C hőmérsékleten, azonkívül növeli az acél reveállóságát is. A Cr elősegíti a többi ötvöző karbidjainak oldódását ausztenitesítéskor, ezzel javítja az acél átedzhetőségét.

A termikus kifáradással szembeni ellenállás szempontjából kedvezőnek tekinthető:

a kis ausztenitszemcse-nagyság,
az egyenletes karbideloszlás,

az acél kis szennyezőtartalma (S, P, Sn, Pb),
a nagy hővezetőképesség és kis hőtágulási együttható.

A fentiekből következik, hogy a hőkezelési technológia helyes megválasztásával is van lehetőség a meleg süllyesztékacélok tulajdonságainak javítására, nagyobb teljesítmények elérésére.

A meleg süllyesztékacélok tulajdonságainak további javítására (kis gáz- és szennyezőtartalom biztosítására, a térbeli anizotrópia megszüntetésére, nagyobb folyási határ és szívósság elérésére stb.) a következő különleges metallurgiai és alakító—hőkezelő eljárások alkalmazása vált szükségessé:

vákuumos kezelés,
vákuumos átolvasztás,
elektrosalakos átolvasztás,
termo-mechanikus alakítás,
diffúziós bórozás,
felrakó hegesztés,
gondosabb felületi megmunkálások,
vákuumban való hőkezelés stb.

A tulajdonképpeni fejlesztéssel foglalkozó kutatók zöme nem új ötvözetekkel kíván eredményt elérni, hanem a felsorolt gyártási eljárásokat igyekszik a szerszámacélok tartóssága érdekében hasznosítani.

A szerszámok élettartamának meghosszabbítását célzó tanulmányok egyik részét azok a munkák teszik ki, melyek a szerszámok tönkremenetelének okait kívánják tisztázni. Gondosan elemzik azokat a kémiai és mechanikai hatásokat, melyek a szerszámokat érik, és vizsgálják, hogy ezek milyen mechanizmus útján hatnak a szerszámra. Így megállapítják, hogy általában koptató igénybevétel, erózió, hőfáradás, mechanikai fáradás, deformáció, rideg repedések keletkezése, korrózió és korróziós fáradás [1, 2] léphet fel. Különösen a koptató vizsgálatok [3, 4] és a súrlódási viszonyok tanulmányozása szerepel gyakran a dolgozatok témái között. A részletes elemzésekre támaszkodva meg lehet tudományos módszerekkel határozni azokat az utakat, melyeknek végső célja a jobb minőségű szerszámok előállítása.

A „jobb minőség" fogalma természetesen ahhoz kapcsolódik, hogyan válik be a szerszám a gyakorlatban. De az egyes anyagok minősítéséhez objektív mérőszámokra van szükség, melyek lehetőleg visszatükrözik az anyag üzemi körülmények közötti viselkedését. Szerszámacélok esetében legtöbbször a hajlító vizsgálatot használják a minősítéshez, de egyre több szerző jut arra a megállapításra, hogy akár a statikus, akár a dinamikus hajlítóvizsgálat kevés a biztonságos ítélet kialakításához [5—7]. Szerencsésebbnek látszik a képlékeny alakítási munka és a folyáshatár [2, 7—9], ill. a „törési szívósság" és folyási határ felhasználása [7, 8].

Átolvasztásnak nevezzük röviden a vákuumban való gáztalanítást [10—12], a vákuumban való újraolvasztást [13], az elektronsugaras átolvasz-

tást [14, 15], a plazma olvasztást [16, 17] és a salak alatti átolvasztást [18—22]. Mind a négy eljárás a szennyező elemek mennyiségét csökkenti, illetve a visszamaradó szennyeződések kedvezőbb, diszperzebb eloszlását teszi lehetővé. Ez utóbbi hatást úgy érik el, hogy egyszerre csak kis mennyiségű anyagot olvasztanak meg, ez az anyag gyorsan dermed, ezért nagyobb arányú dúsulásra, kiválásra nincs lehetőség. Az egyes eljárások hatásossága, gazdaságossága és alkalmazási területe egymástól jelentősen eltér [23—26]. A legkedvezőbbnek a szintetikus salakkal kombinált vákuumos olvasztás látszik. Ehhez egészen közelállóan jó eredményeket ad a plazmaolvasztás is. Az átolvasztott acélok egyik jó tulajdonsága az igen csekély anizotrópia, mely a jól elosztott zárványok következménye [27, 28]. Változik az átolvasztás következtében az átedzhetőség, bár e téren erősen ellentmondó közlemények látnak napvilágot [29—31]. Mindezek eredményeképpen a szerszámok élettartama az átolvasztás nélküli anyagokból készült szerszámokhoz viszonyítva átlagban a kétszeresére nő, kivételes esetben azonban hatszoros élettartam növekedést is megfigyeltek [15, 32, 33].

A szerszámanyagok minőségének növelése hatásosan történhetik az optimális hőkezelés megválasztásával is [2, 34, 35]. Az ausztenitizálás hőmérsékletének és időtartamának itt különösen nagy jelentősége van [36]. A kellő mennyiségű karbon és ötvöző oldatba vitele érdekében elegendően nagy hőmérséklet és idő szükséges, más oldalról viszont azt tapasztalták, hogy túlzott ausztenitizálási időtartam apró repedések keletkezéséhez vezetett [37, 38]. Ez az acél szívósságát erősen rontotta.

A hőkezelés elsődleges eredménye — a megfelelő szövetszerkezet kialakulása — mellett a tulajdonságokat döntő mértékben befolyásolják olyan tényezők, melyek ugyan többé-kevésbé hőkezelési hibának tekinthetők, de amelyekkel mindig számolni kell a valóságban. Ilyen hiba lehet pl. a felület elszéntelenedése vagy felszenesedése. Ide sorolhatók a hőkezelést közvetlenül követő köszörülés okozta hibák is, melyek a felület túlzott felmelegedéséből származnak. Jellegzetes ilyen hibák a köszörülési repedések és a felületi réteg kilágyulása. Ezek a hibák nemcsak a gyakorlatban okozhatnak kellemetlen meglepetéseket, hanem gyakran a közölt vizsgálati eredményeket is kétségessé teszik.

A nagyszilárdságú, viszonylag rideg szerszámacélok hőkezelésénél a visszamaradt feszültségek értéke is nagy lehet, ezért hatásukkal számolni kell. A visszamaradt feszültségek a szövetszerkezet stabilitására is kihathatnak [39], valamint utólagos méretváltozásokat okozhatnak a szerszámon [40], ami selejtes gyártáshoz vezethet. A közvetlenül edzés után keletkező feszültségállapotot nemcsak a megeresztés, de a végső méretre való köszörülés is erősen befolyásolhatja [41]. A hőkezelésnél keletkező feszültségek általában károsak, ezért azokat csökkenteni kell. Megfelelő szerszámszerkesztéssel, előfeszített szerszámrészekkel azonban olyan feszültség állapotot is létre lehet

hozni, amely az aktív feszültségeket csökkenti és így a szerszám tartósságát növeli.

A visszamaradt feszültségek csökkentése érdekében alkalmazott megeresztés egy újabb veszélyt rejt magában: a megeresztési ridegséget [42, 43]. Erre különösen a nagy karbontartalmú acélok hajlamosak, melyeknél a szubszemcsehatárokon jelentkezhetnek kiválások. A megeresztési ridegséget vagy öregedést nemcsak a hasznos ötvözők, hanem a káros szennyezők is előidézik. Ezért különös figyelmet érdemel annak vizsgálata, hogy az átolvasztott és így sokkal tisztább acélok hőkezelésénél miképpen alakulnak az acél mechanikai tulajdonságai [44—46].

A hőkezelésnek egyik speciális válfaja az ausforming, amelynél a hőkezelés alakítási keményítéssel párosulva okoz szilárdság növekedést [47—49]. Az eljárás alkalmazhatóságának alapfeltétele, hogy az ausztenit elbomlásának lappangási ideje elegendően hosszú legyen az alakítás elvégzéséhez. Ezért az erősen ötvözött szerszámacélok igen alkalmasak erre a célra. Így pl. 10÷14% Cr tartalmú acélokat [50], gyorsacélokat [48] és egy sor más szerszámacélt [51] sikeresen használtak fel az ausforming eljáráshoz. A termomechanikus kezelésnek különböző fajtái lehetségesek aszerint, hogy milyen hőmérsékleten történik az alakítás és az ausztenit elbomlása. A termék szilárdságát és szívósságát ezek a körülmények szintén befolyásolják [52].

Mivel a szerszámok tönkremenetelének egyik fő oka a kopás, érthető, hogy az élettartam meghosszabbítását sokan a felület kopásállóságában keresik. Elvétve foglalkoznak a felület gondosabb megmunkálásával, elektrokémiai módszerek alkalmazásával is, de túlnyomó többségben kemény, kopásálló rétegek létrehozását javasolják. E téren a legeredményesebben a nitridálás használható. A nitrid réteg tulajdonságaival, a réteg keletkezésének feltételeivel és felépítésével sokan foglalkoztak [53]. A nitridálás során keletkező saját feszültségek fontos tényezői lehetnek a szerszám viselkedésének.

Mivel a szerszámacélok összetétele nem egyezik teljesen a kifejezetten nitridálás céljaira kifejlesztett acéltípusokkal, nem lehetett okvetlenül az optimális rétegtulajdonságok elérését célul tűzni [54]. Ez különösen az alacsonyan ötvözött szerszámacélokra érvényes, a 12÷14% Cr tartalmú acélok viszont kiváló eredménnyel nitridálhatók.

Bár a szerszámacélok karbon- és krómtartalma viszonylag nagy, mégis tudósítanak keményfémek cementálásáról [55] és süllyesztékek diffúziós krómozásáról is.

Kísérletek folynak a meleg süllyesztékek élettartamának növelésére felületi bórozással is [56], illetve élfelhegesztéssel [57—61]. Kísérletek folynak a melegalakító süllyesztékacélok vákuumban történő hőkezelésére (edzés, megeresztés) is [62, 63] tisztább felületek, kisebb elhúzódások elérése érdekében.

Viszonylag új és jó reményekre jogosító eljárás a „rövid idejű ausztenitizálás". Extrém gyors felületi hevítés, majd ezt követő gyors lehűtés eredménye-

képpen a felületen különlegesen finom szemcsés és szívós, kemény kéreg keletkezik. A szemcséket még elektronmikroszkóppal sem lehet felbontani, ezért ennek a rétegnek a felépítése még nem tisztázott [64]. Többen úgy vélik [65], hogy az extrém gyors hevítés folytán valamilyen különleges ausztenit keletkezik, mely viszonylag stabil és csak egy esetleges későbbi mechanikai hatásra (pl. keménységmérés, külső igénybevétel) alakul át igen finom szemcsés martenzitté. Ez magyarázná az egyidejűleg tapasztalt nagy keménységet és nagy szívósságot. A gyors hevítéshez dörzstárcsát, elektron-, lézer- vagy plazmasugarat lehet felhasználni [66].

A fejlesztési munkák másik nagy csoportjának azokat a törekvéseket lehet tekinteni, ahol új ötvözőkkel, az ötvözők arányának változtatásával, újszerű kombinációk előállításával igyekeznek célt elérni. Természetesen a kutató munkáknak ez a besorolása eléggé önkényes, hiszen gyakran éppen az újfajta anyag kíván újfajta, módosított technológiát. Erre az utóbbira jó példa a maraging acélok alkalmazása szerszámanyagként [67]. Ezeket az acéltípusokat eredetileg szerkezeti acéloknak használták, összetételük is a szerkezeti acélokénak felel meg, de kiváló szilárdságuk miatt szerszámacélként is jól használhatók. Természetesen ezeknek az acéloknak összetétele még korántsem behatárolt terület. Az egyes ötvözők és szennyező elemek hatásának vizsgálata még sok munkát igényel [68]. A káros szennyezők mennyiségének vákuumos átolvasztással való csökkentése ezeknél az acéloknál is előnyös [69].

A sok komponensű Mo-t, V-t, Co-t is tartalmazó acélok szinte végtelen számú variációiból mindig újabbakat és újabbakat ajánlanak [70—73]. Ezeknek az acéloknak a szerzők az általános jó tulajdonságok mellett valamely kiemelkedő egyéb sajátosságot is tulajdonítanak: kopásállóságot, mérettartóságot, hőállóságot stb. Különösen sokat foglalkoznak a V-mal mint ötvözővel, és előnyösen alkalmazzák.

Az új típusú ötvözetek közül a legjelentősebb talán az a csoport, melyet porkohászati úton állítanak elő. Ezek igen nagy szívósságukkal és kopásállóságukkal tűnnek ki a nyomásos öntőformabetétek készítésénél [74]. Itt új eredményeket igér az a módszer, ahol „atomizált" igen finom porból, Co-Cr-W karbidokból sajtolták a szerszámokat [55]. Ezen az úton növelni lehetett a karbid mennyiségét egészen 40% W, ill. 3% C-ig anélkül, hogy ennek a káros, túlzott ridegségben megnyilvánuló hatása érezhető lenne. A porkohászatilag előállított termékek közül foglalkoznak még a ferró TiC-ból álló félig acél félig keményfém ötvözetekkel. Mint szerszámanyagot e helyen éppen csak megemlítjük a kerámiai lapkákat és a félig keramikus, félig fémes keverékeket. Ezeknek igen széles skálája készül porkohászati úton. Maga a porkohászati eljárás is gazdagodott az igen nagy nyomások, nagy hőmérsékletek és a nagy sebességű tömörítés alkalmazásával, ami egyre jobb minőségű termékek előállítását teszi lehetővé [55].

Kísérletek folynak az igen bonyolult, mélyüregű meleg szerszámok precíziós öntéssel való előállítására is [75, 76]. Az öntési technológia ma már megengedi, hogy gyakorlatilag szerelésre kész szerszámokat öntsenek, amelyek csak igen csekély igazítást, megmunkálást igényelnek. Az öntött szerszámoknak is kielégítő a szívóssága és nagy a kopásállósága.

4. A meleg süllyesztékacélok csoportosítása

A süllyesztékacélok négy nagy csoportba sorolhatók (II. táblázat):

A) Termikus kifáradással szemben legnagyobb ellenállással rendelkező süllyesztékacélok.

II. táblázat

Acél-csoport	C %	Cr %	W %	Mo %	V %	Ni %	Co %	Si %	45 HRC
	0,35	5	4	0,5	0,5			1	
	0,35	5	2		0,8			1	
	0,35	5	1,5	1,5	0,4			1	600
	0,35	5		1,5	0,4			1	620
	0,35	5		1,5	1			1	°C-ig
	0,5	3,2		1,5					(1 ó)
A	0,4	3	0,6	1,2	0,5			1	
	0,4	3	0,6	2,5	0,35			1	
	0,4	3		3	0,6				
	0,4	3,5	1	1,4	0,7			0,8	
	0,45	3	3	1	1,6				
	0,3	2,5	5		0,3				
	0,25	12	3	0,5	0,2			0,5	
	0,35	2,5	8		0,35				
	0,35	2,5	10		0,3				
	0,35	2,5	10		0,3	2			
	0,35	3,5	12		0,5				
	0,45	3,5	15		0,5				
	0,5	4	18		1				
	0,6	4	9	1	0,7				
B	0,4	4	4	0,5	0,5			0,8	
	0,4	5	5	0,25	0,25			1	
	0,4	2,5	5	0,8	0,8				
		2,5	3	2,5	1			1	650—
		2,5	3	2,5	1	2		1	670
		3,5	2,2	2,2	1,5				°C-ig
		4	1,5	8	1				(1 ó)
		4		8	2				
		4	6	5	2				
	0,35	6	6		0,6			1,2	
	0,25	12	7		0,5		5		
C	0,25	12	8		0,5		10		
	0,2	10	5	2	0,2		10		
	0,3	12	12		1,0				700 °C felett

II. táblázat folytatása

Acél-csoport	C %	Cr %	W %	Mo %	V %	Ni %	Co %	Si %	Al %	Nb %	Ti %	Mn %
C	0,5 0,35	13 22	2,5	 1,3	0,5 1,4	13 8		1,3		 0,35		 8
	<0,05 <0,06 0,2 0,25 0,03	 21 16 19		5 5 2,5 alap	 3	18 alap alap 10	8—10 7		0,8 4	 1,5	0,6 2,5 1 0,2	700 °C felett
D	0,55 0,55 0,55 0,55 0,35—0,55 0,5 0,5	0,7 1,0 0,7 1,5 1 3 3	 0,55 0,55 2 0,8	0,3 0,8 0,2	 0,1 0,2 0,2	1,6 1,6 1,6 1,0 1	 	 1 1 1	 	 	 	 300÷500 °C-on

B) Nagy melegszilárdságú süllyesztékacélok.

C) Igen nagy melegszilárdságú acélok és ötvözetek.

D) Gyengén ötvözött meleg süllyesztékacélok.

5. A hazai melegszerszámacél kutatások áttekintése

A hazánkban (Csepel Vas- és Fémművek, Lenin Kohászati Művek) jelenleg gyártott, ill. bevezetés alatt álló meleg süllyesztékacélok összetétele a III. táblázatban látható.

A melegszerszámacélok fejlesztését célzó sokrétű kutatást jelenleg egyetlen szerv sem fogja össze. Minden gyártóműnél, sőt sok felhasználónál (pl. Csepel Fémmű) és több kutatóhelyen folynak szerteágazó kísérletek. Így pl. a melegalakító süllyesztékacélok tulajdonságainak széles körű vizsgálata folyik a BME Mech. Techn. és Anyagszerkezettani Intézetében, a Csepel Vas- és Fémművek Acélműben, Fémműben és MAI-ban, a Lenin Kohászati Műveknél, a GTI-ben, a Vasipari Kutató Intézetben, a MNME-en, a Ganz-MÁVAG-ban a DANUVIA-ban.

A szerteágazó vizsgálatok bizonyos összhangja és közös érdeke figyelhető meg a BME Mech. Techn. és Anyagszerk. Intézet, a Csepel Acélmű, Fémmű, MAI és a Vasipari Kut. Int.-ben folytatott vizsgálatoknál, amelyek a különböző átolvasztások és hőkezelések hatását, eredményességét vizsgálják a fent megjelölt acélok mechanikai és fizikai tulajdonságaira [7, 8, 15, 45, 46, 77]. Az ilyen közös tevékenységet, egymás lehetőségeinek (szellemi kapacitásának) kihasználását a jövőben is célszerű lesz fenntartani és talán jobban koordinálni.

III. táblázat

Minőség	C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	W %	V %	Mo %	S %	P %	Kovácsolt tömb ára
W 1 MSZ 4352–66	0,25	max.	max.	2,0	1,50	9,0	0,20		max.	max.	57 318 Ft/t
	0,35	0,40	0,50	3,0	2,50	11,0	0,40		0,030	0,030	
W 2 MSZ 4352–66	0,25	max.	max.	2,0		9,0	0,20		max	max.	53 165 Ft/t
	0,35	0,40	0,50	3,0		11,0	0,40		0,030	0,030	
W 3 MSZ 4352–66	0,25	max.	max.	2,0		4,0	0,20		max.	max.	35 676 Ft/t
	0,35	0,40	0,50	3,0		6,0	0,40		0,030	0,030	
EI 956 GOSZT 5632–61	0,33	0,70	max.	4,25		3,0	0,35	0,40	max.	max.	35 676 Ft/t
	0,40	1,00	0,40	5,25		4,5	0,60	0,55	0,035	0,035	
NK MSZ 4353 66	0,50	max.	0,50	0,60	1,40			0,20	max.	max.	14 505 Ft/t
	0,65	0,35	0,80	1,00	1,80			0,40	0,040	0,040	
K 13 MSZ 19731-T.	0,35	0,80	0,40	5,00			0,85	1,20	max.	max.	35 676 Ft/t
	0,45	1,10	0,60	5,50			1,15	1,50	0,030	0,030	
K 14 MSZ 19731-T.	0,24	0,20	0,20	2,60			0,45	2,50	max.	max.	35 676 Ft/t
	0,32	0,40	0,40	3,10			0,56	3,00	0,030	0,030	
19731-T.	0,38	0,5	0,4	5			0,5	3			

IV. táblázat

Az átolvasztás hatása az acélok szennyezőelem tartalmára

Acél	Olvasztás módja	Si %	S %	P %	Cu %	O_2 ppm	N_2 ppm	H_2 ppm
W 3	Normál ívfényes	0,30	0,017	0,028	0,28	70	75	1,0
	Elektrosalakos	0,12	0,007	0,025	0,20	44	72	0,6
	Elektronsugaras	0,28	0,014	0,022	0,12	31	41	0,5
	Vákuum ívfényes	0,30	0,016	0,028	0.18	27	70	0,2
K 13	Normál ívfényes	0,96	0,023	0,027	0,22	63	105	2,5
	Elektrosalakos	0,85	0,008	0,029	0,19	50	89	0,3
	Vákuum ívfényes	0,92	0,020	0,026	0,21	36	82	0,4
K 14	Normál ívfényes	0,28	0,014	0,010	0,22	75	108	2,0

Az utóbbi években e közös tevékenységben elért néhány eredményről célszerűnek látszik itt is beszámolni. Néhány meleg süllyesztékacél fajta (W3,

V. táblázat

Az átolvasztás hatása az acélok zárványosságára

Acél	Olvasztás módja	Zárványosság fokozatai		
		Szulfidok	Oxidok	Szilikátok
W 3	Normál ívfényes	2/b	2	2/a
	Elektrosalakos	0,5/b	1	0
	Elektronsugaras	1/b	1	1/a
K 13	Normál ívfényes	2,5/b	1,5	3/a
	Elektrosalakos	1/a	1	2,5/a
	Vákuum ívfényes	2/b	1	1,5/b
K 14	Normál ívfényes	2/b	2	2/a

K 13, K 14) alkalmasnak bizonyult pl. a nemrégen kifejlesztett nagy sebességű alakítási technológia szerszámainak anyagaként is.

A különböző átolvasztások hatása a vizsgált acélok szennyező tartalmára és a zárványosság mértékére a IV. és V. táblázatban látható.

5.1. *A süllyesztékacélok szívósságának mérőszámai*

Az acélok szívósságának (ridegtörés elleni biztonságának) jellemzésére az üzemekben használatos fajlagos ütőmunka (KCU = mkp/cm²) mellett használható még a szakítókísérlet adataiból meghatározható fajlagos törési munka [2, 7]:

$$W_c = \int_0^{\lambda_e} \sigma' d\lambda \ \text{mkp/cm}^3,$$

ahol σ' — valódi feszültség,
λ — valódi nyúlás.

valamint a nagy szilárdságú anyagokra alkalmazható törésmechanikai anyagjellemző, a G_{1c} „törési szívósság", vagyis az egységnyi hosszúságú repedés terjesztéséhez szükséges fajlagos erő (kp/mm), illetve a feszültségállapottól függő, a G_{1c}-vel meghatározott összefüggésben levő $K_{1c} = \text{kp/mm}^{3/2}$ kritikus feszültségintenzitás paraméter [7, 8, 46]. A ridegtörésnél ui. a repedés spontán terjedésének döntő szerepe van.

A K_{1c} feszültségintenzitás paraméter függvénye a terhelésből adódó átlagfeszültségnek (σ), a darab méretének és a terjedő repedés hosszúságának

(*a*). A nagy szilárdságú süllyesztékacélok feszültségintenzitás paraméterének mérésére kísérleteink alapján alkalmasnak bizonyult [7, 8]

a) az élesen ($\varrho < 0{,}025$ mm) bemetszett, $d/D = 0{,}667$ viszonyú, hengeres próbatestek szakítóvizsgálata;

$$(K_{1c})_s = y \frac{F_{max}}{\sqrt{D^3}} \qquad \text{kp/mm}^{3/2},$$

$$(K_{1c})_s \approx 0{,}414\, \sigma \cdot \sqrt{D} \qquad \text{kp/mm}^{3/2},$$

ahol F_{max} – a maximális erő,
D – a próbatest legnagyobb átmérője,
y – a próbatest méreteitől, a repedés hossztól függő tényező,

b) a fárasztással előrepesztett V-bemetszésű ütvehajlítópróbák regisztrált ütvehajlító vizsgálata;

$$(K_{1c})_d = y \frac{6 \cdot M \cdot \sqrt{a}}{B \cdot W^2} \qquad \text{kp/mm}^{3/2},$$

ahol M – a hajlítónyomaték,
a – a repedés hossza,
B, W – a próbatest szélessége, vastagsága,

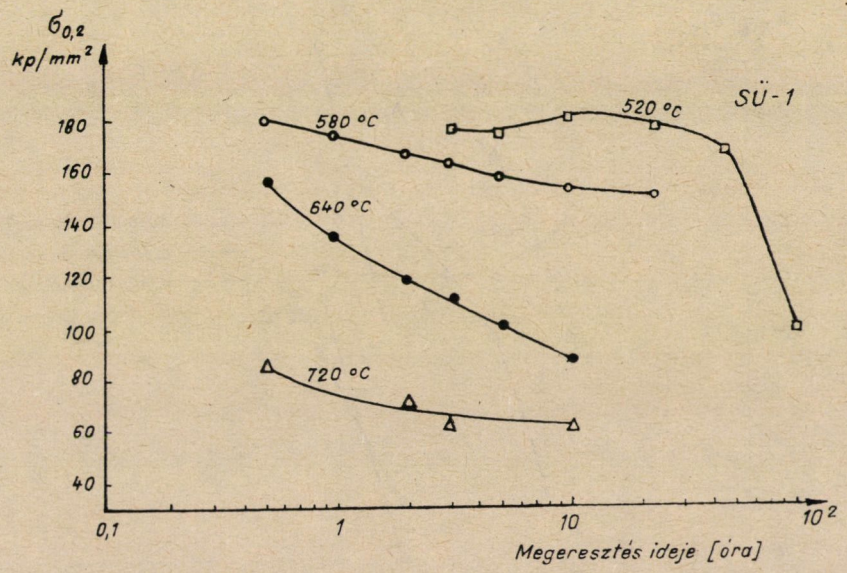
c) a sima hengeres próbatestek fáradt töretének vizsgálata

$$(K_{1c})_f \approx \sigma \cdot \sqrt{\pi l_{rep.}} \qquad \text{kp/mm}^{3/2},$$

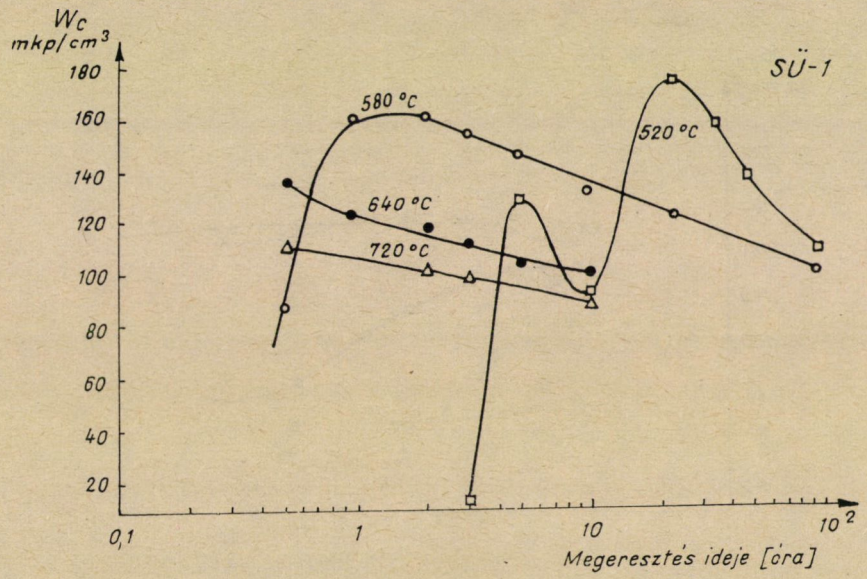
ahol σ – a feszültségamplitúdó,
l – a repedés hossza.

5.2. *A kísérleti eredményekből levonható következtetések*

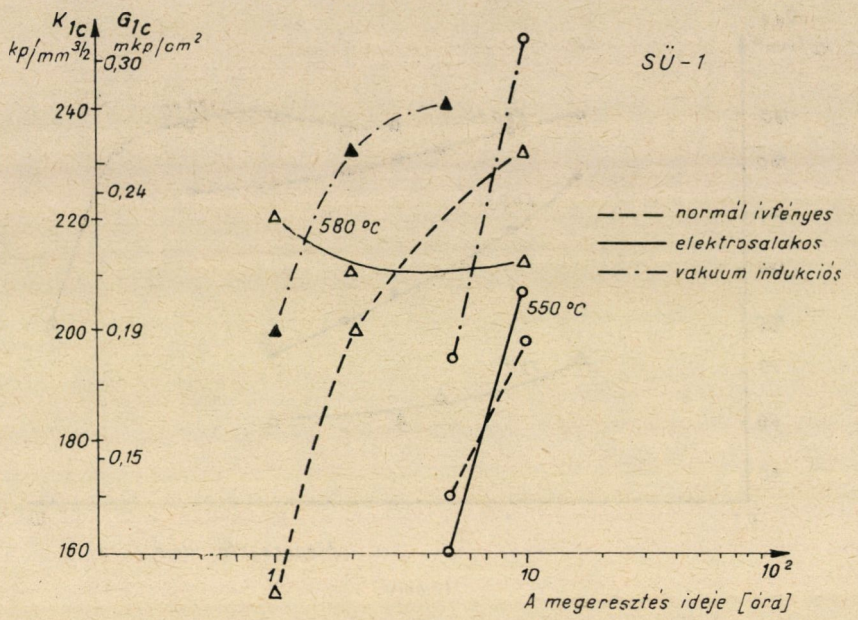
A vizsgált acélok folyási határa, fajlagos törési munkája és „törési szívóssága" is érzékenyen reagál a hőkezelés vagy az átolvasztás okozta szövetszerkezeti változásokra (VI—VIII. táblázat). Példaként bemutatunk hat ábrát a $\sigma_{0,2}$, a W_c és a K_{1c} változására a megeresztési paraméterek függvényében (1—6. ábra). Vizsgálataink eredményei azt bizonyítják, hogy az átolvasztott süllyesztékacélok fajlagos törési munkája, „törési szívóssága" ugyanolyan szilárdsági jellemzők mellett 20÷40%-kal meghaladja a normál ívfényes módon előállított acélok szívóssági jellemzőit. Ily módon lehetőség van


$\sigma_{0,2}$
kp/mm²
180
160
140
120
100
80
60
40
580 °C
520 °C
SÜ-1
640 °C
720 °C
0,1
1
10
10²
Megeresztés ideje [óra]

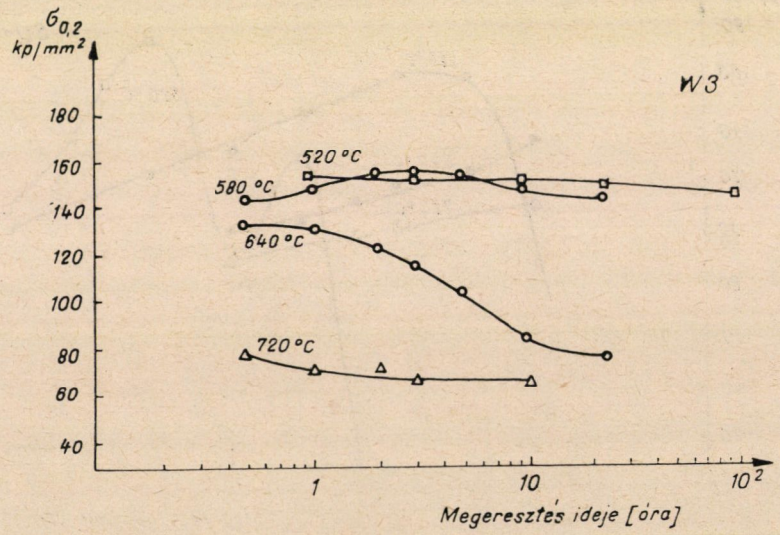
1. ábra


Wc
mkp/cm³
180
160
140
120
100
80
60
40
20
SÜ-1
580 °C
520 °C
640 °C
720 °C
0,1
1
10
10²
Megeresztés ideje [óra]

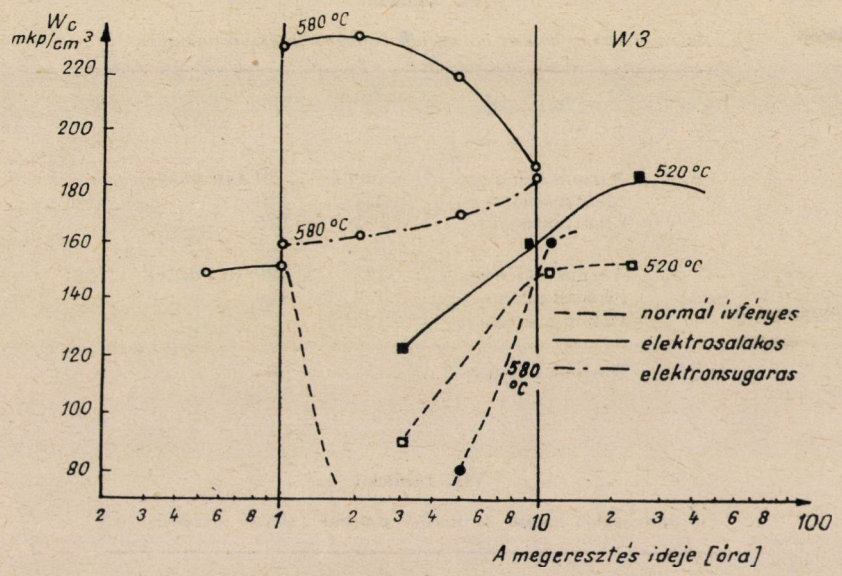
2. ábra


K_{1c} kp/mm$^{3/2}$
G_{1c} mkp/cm^2
SÜ-1
240
220
200
180
160
0,30
0,24
0,19
0,15
580 °C
550 °C
normál ívfényes
elektrosalakos
vakuum indukciós
1
10
10^2
A megeresztés ideje [óra]

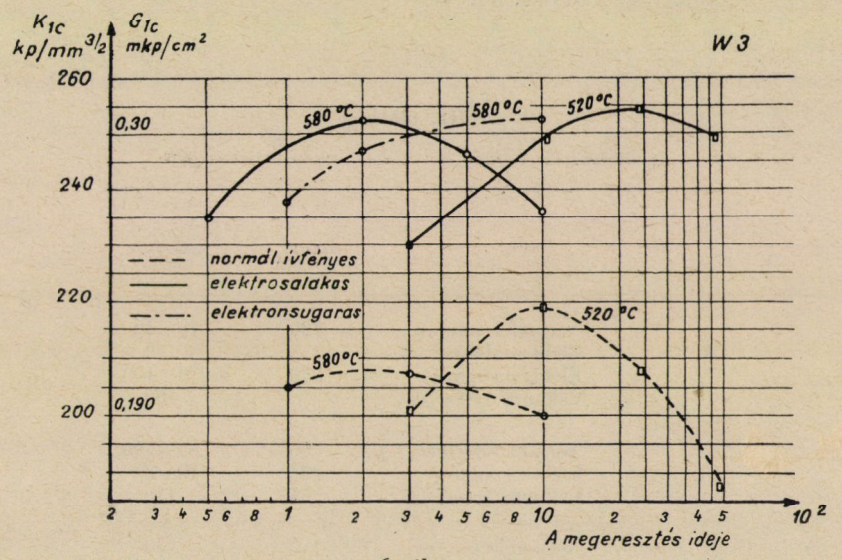
3. ábra


$\sigma_{0,2}$ kp/mm^2
W3
180
160
140
120
100
80
60
40
520 °C
580 °C
640 °C
720 °C
1
10
10^2
Megeresztés ideje [óra]

4. ábra


Wc
mkp/cm³
220
200
180
160
140
120
100
80
580 °C
W3
520 °C
580 °C
520 °C
normál ívfényes
elektrosalakos
580 °C
elektronsugaras
2 3 4 6 8 1 2 3 4 6 8 10 2 3 4 6 8 100
A megeresztés ideje [óra]

5. ábra


K1c
kp/mm³/²
G1c
mkp/cm²
W3
260
240
220
200
0,30
0,190
580 °C
580 °C
520 °C
normál ívfényes
elektrosalakos
elektronsugaras
580 °C
520 °C
2 3 4 5 6 8 1 2 3 4 5 6 8 10 2 3 4 5 10 z
A megeresztés ideje

6. ábra

VI. táblázat

Az átolvasztás hatása az acélok fajlagos törési munkájára

Acél	Olvasztás módja	W_c max.	mkp/cm³ min.
W 3	Normál ívfényes	160	30 (70 edzve)
	Elektrosalakos	235	120
	Elektronsugaras	185	125
K 13	Normál ívfényes	165	90 (0 edzve)
	Elektrosalakos	170	100
	Vákuum ívfényes	195	
K 14	Normál ívfényes	155	85

VII. táblázat

Az átolvasztás hatása az acélok statikus „törési szívósságára"

Acél	Olvasztás módja	$(K_{1c})_s$ max.	kp/mm$^{3/2}$ min.
W 3	Normál ívfényes	220	180
	Elektrosalakos	255	220
	Elektronsugaras	300	235
SÜ-1	Normál ívfényes	230	130
	Elektrosalakos	220	160
	Vákuum ívfényes	260	190
X 32	Normál ívfényes	175	140

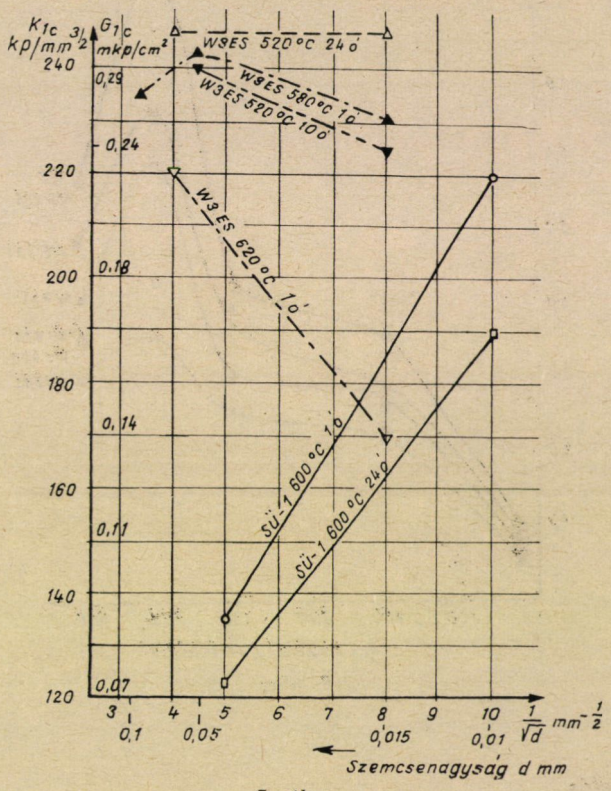
VIII. táblázat

Az átolvasztás hatása az acélok „törési szívósságára"

Acél	Olvasztás módja	K_{1c} kp/mm$^{3/2}$ szakítás $\varrho \leqq 0{,}025$	kp/mm$^{3/2}$ dinamikus hajlítás
W 3	Normál ívfényes	220	70—40
	Elektrosalakos	255	120
	Elektronsugaras	270	70—100
	Vákuum ívfényes		100
SÜ-1	Normál ívfényes	205	60—100
	Elektrosalakos	220	110—85
	Vákuum ívfényes	255	110
X 32	Normál ívfényes	175	153

arra is, hogy az acélok folyási határát, szilárdságát tovább növeljük a szívósság elvesztése, csökkenése nélkül.

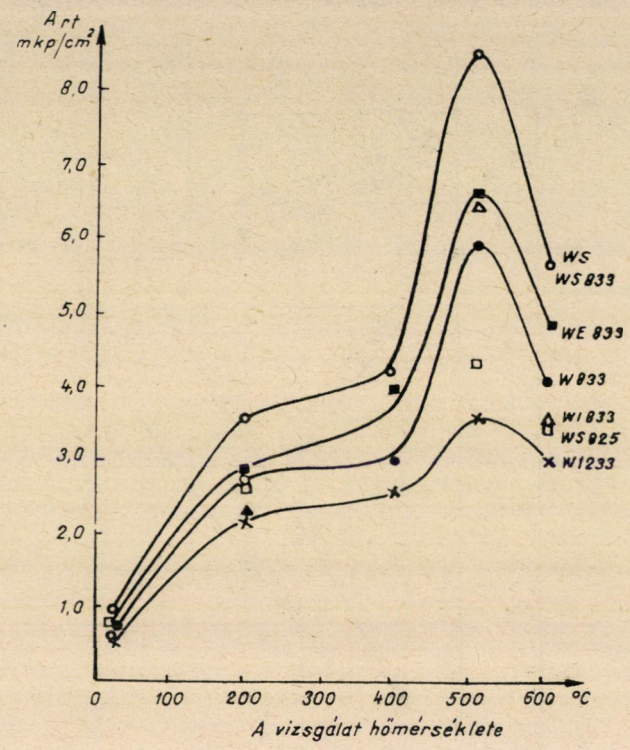
Minden acélra kiválasztható a hőkezelési paraméterek (ausztenitesítés hőmérséklete, a megeresztés hőmérséklete és ideje) olyan optimális kombinációja, amelynek hatására kialakult szövetszerkezetnél a fajlagos törési munka, a „törési szívósság" maximális és ugyanakkor a folyási határ is a legnagyobb.



7. ábra

Az átolvasztások jelentősen csökkentik az acél szennyezőelem tartalmát (IV. táblázat) és természetesen a zárványosságát is (V. táblázat). Az elektrosalakos átolvasztás erős kéntelenítő hatása mellett az acél oxigéntartalmát is jelentősen csökkenti. Csökken a szennyezőelemeknek a szemcsehatárokon való feldúsulása is. A tisztább szemcsehatárok kohéziós szilárdsága nagyobb lesz. A tiszta acél szívóssága kevésbé érzékeny pl. a szemcsenagyságra (7. ábra), és a nagy hőmérsékleten mért szívóssága (repedésterjedési energiája) is nagyobb lesz (8—9. ábra), mint a normál acéloké.

A vákuum ívfényes és az elektronsugaras átolvasztás kéntelenítő hatása nem olyan jelentős, mint az elektrosalakos átolvasztásé, viszont gáztalanító (O_2, H_2) hatásuk lényegesen meghaladja az utóbbiét. A gáztartalom és zárványosság csökkenése itt is a szívóssági jellemzők lényeges növekedéséhez vezet.



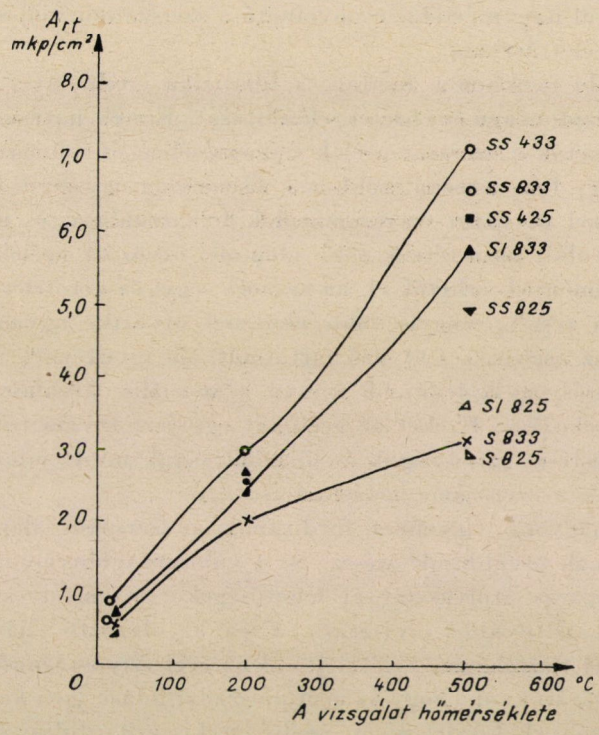
8. ábra

5.3. Összefoglalás

A nagy szilárdságú süllyesztékacélok mechanikai tulajdonságaira, elsősorban szívósságára, kedvező hatással vannak a nemfémes zárvány- és a gáztartalmat csökkentő átolvasztások.

A süllyesztékacélok statikus, ciklikus és dinamikus „törési szívóssága", valamint a fajlagos törési munkája jelentős mértékben függ az acélok olvasztási módjától és a hőkezelés körülményeitől.

A szívósság anyagjellemzői: G_{1c} és W_c, a szilárdságot jellemző folyáshatár mellett jól felhasználhatók a folyási határ és a szívóssági jellemzők együttes maximális értékét biztosító optimális szövetszerkezet, ill. hőkezelési paraméterek beállítására.



9. ábra

6. Javaslatok

A magyar szerszámgyártás hatékonyságának növelését, magasabb műszaki színvonalra történő emelését megkövetelik az új gazdasági mechanizmus megváltozott körülményei és a gépipar, feldolgozóipar állandó, jelentős fejlődési üteme.

A szerszámanyagok minőségének javítása fontos és szükséges. Új anyagok kísérleti gyártása csak abban az esetben lehetséges, amennyiben megfelelő mennyiségben rendelik. Az alapkutatási feladatok megjelölésénél elsősorban ezeket kell figyelembe venni.

a) Az MTA illetékes szervei a tanulmány elfogadása után bízzanak meg egy kutatóhelyet vagy csoportot a részletes kutatási program kidolgozásával. A kutatás összefogására azt az intézményt kell kijelölni, ahol a fejlesztés alapfeltételei már adottak. Javasoljuk a BME Mechanikai Technológiai és Anyagszerkezettani Intézetében működő akadémiai csoportot mint MTA kutatóhelyet erre a feladatra.

b) A szerszámok fejlesztésekor igen nagy jelentősége van a mind tökéletesebb szerszámanyagok alkalmazásának. Az új és továbbfejlesztett anyagok

felhasználásával nagymértékben növelhető a szerszámok teljesítménye, üzembiztonsága és élettartama.

Az utóbbi években a fémtan, a fémfizika eredményei lehetővé tették mind jobb tulajdonságú ötvözetek előállítását. Ennek hatására alapvető változások észlelhetők a szerszámacélok fejlesztésében és felhasználásában. Megfigyelhető, hogy fokozatosan csökken a viszonylag egyszerű, ötvözetlen vagy egy-két elemmel ötvözött szerszámacélok felhasználása, és mindinkább terjednek a bonyolult összetételű, több elemmel ötvözött acélok. A tapasztalat szerint jó eredmények érhetők el, ha az acél vegyi összetételét célszerű módon bonyolultabbá teszik, vagyis több elemmel ötvözik, ugyanakkor azonban nem növelik az acél összes ötvöző tartalmát, sőt igyekeznek azt csökkenteni.

Az ötvözés egyik legújabb iránya a speciális, kiválásosan keményedő ötvözetek létrehozása. Ezeket az acélokat egyrészt kiváló technológiai tulajdonságaik, másrészt szívósságuk és jó hőállóságuk miatt mind szélesebb körben használják a szerszámgyártásban is.

Egyre nagyobb figyelmet fordítanak a szerszám alapanyag gyártástechnológiájának továbbfejlesztésére is. A vákuum ívfényes, az elektrosalakos, az elektronsugaras átolvasztás új lehetőségeket teremtett a szerszámacélok tulajdonságainak további javítására. Ezek az olvasztó eljárások jelentősen növelik az acél tisztaságát, ezáltal javul az acél szívóssága. Másik jellemzője ezeknek az eljárásoknak, hogy az acél megszilárdulása igen kedvező kristályosodási körülmények között megy végbe. A kis szilárdulási sebesség, a nagy hőmérsékletgradiens és más tényezők homogén, dúsulásmentes, finom szövetű, öntött szerkezetet eredményeznek. A fejlett ipari országokban a szerszámacélok mind nagyobb hányadát gyártják ezekkel a korszerű acélgyártási eljárásokkal.

A jelenleg világszerte ismert ötvözött melegmegmunkáló szerszámacélok száma mintegy 300-ra tehető. Ezeknek az acélminőségeknek jelentős részét a különböző országokban szabványosították. Mind a kohászok, mind a szerszámgyártók igyekeznek ezt az igen széles választékot szűkíteni. Nyilvánvaló, hogy ilyen sokféle acélra nincs szükség. Számos típus hasonló tulajdonságokkal rendelkezik, tehát egymással helyettesíthető. Másrészt az új, jobb tulajdonságokkal rendelkező anyagok bevezetésével a régebbi, korszerűtlen acélok feleslegessé válnak.

Az új összetételű ötvözetek kutatása helyett javasoljuk a külföldön gyártott acéltípusokból hazai felhasználásra alkalmas típusok kiválasztását és gyártásuknak meghonosítását. A gyártástechnológia továbbfejlesztése érdekében célszerű a vákuum ívfényes, az elektrosalakos és az elektronsugaras átolvasztás új lehetőségeinek vizsgálata.

c) A képlékeny alakító szerszámok jobb méretezése érdekében ki kell dolgozni a szerszámok élettartamra való méretezésének elméletét, valamint meg kell határozni a szerszámanyagok élettartam szilárdságát sima és bemetszett állapotban.

d) A meglevő szerszámanyagok minősége jelentékenyen javíthatónak látszik megfelelő hőkezelési technológia alkalmazásával. Vizsgálatokat kell végezni a szerszámacélok edzhetőségének és megeresztésállóságának meghatározására.

Egyes acélfajták melegszilárdsági tulajdonságainak meghatározása célszerű. Elsősorban melegsajtoló, valamint öntőszerszámok készítésére használt acélminőségeken kell a vizsgálatokat elvégezni.

Az elridegedés hőmérsékleti határainak meghatározására hőkezelési kísérleteket célszerű végezni. A minősítést az eddig is szokásos mérőszámok mellett a fajlagos törési munka (W_c = mkp/cm^3) kiegészítésével lehetne kiegészíteni.

A szerszámacélok melegalakíthatóságának vizsgálatára módszerek kidolgozása célszerűnek látszik. Laboratóriumi és üzemi vizsgálatok egyaránt szükségesek a megbízható minősítéshez.

e) Egyes szerszámacélfajták termomechanikus kezelésére való alkalmasságának vizsgálata eredményre vezethet, egynéhány tipikus forgácsoló szerszám éltartamának növelésében. Ugyanezen pont keretében vizsgálandó vákuumban öntött képlékeny alakító süllyesztékek készrekovácsolása ausforming technológiával.

f) A képlékeny alakító szerszámok élettartamát igen erősen befolyásolja a munkadarab kialakítása. A munkadarabok tervezésénél eddig megkötöttséget jelentett a szerszám megmunkálhatósága, mivel a hagyományos szerszámgépeken csak kör és egyenes vonalú profilok állíthatók elő elsősorban. Elméleti megfontolások azt mutatják, hogy a legkisebb alakítási ellenállás akkor adódik, ha a szerszám profilja egy optimálisan kiképzett görbe, melyet variációszámítással lehet meghatározni. Ilyen típusú görbékkel határolt szerszámok azonban csak NC szerszámgépeken állíthatók elő. Megvizsgálandó együttesen az NC szerszámgépen való alkatrészgyártás költsége abban az esetben, ha az NC gépre kerülő előtermék a képlékeny alakítás szempontjából optimális kontúrokkal rendelkezik. Meghatározandó az előgyártmány optimális mérete és alakja, figyelembe véve az NC gépek szerszámainak optimális kihasználását. Ezen téma keretében megvizsgálandó az is, hogy a kész munkadarab készítéséhez szükséges program hogyan és milyen módosításokkal használható fel az előgyártmány képlékeny alakító szerszámának programozásához.

A tanulmányban megpróbáltuk azoknak a kutatási területeknek a megjelölését, ahol hazai adottságaink és lehetőségeink mellett célszerűnek tartjuk a kutatómunka végzését. A szerszámgyártás jelenleg is fennálló, de a jelenlegi fejlesztési ütem mellett a jövőben is egyre növekvő elmaradottsága, csak jelentős erőfeszítésekkel, a leírt legfontosabb kutatási témák megvalósításával és széles körű üzemi bevezetésével szüntethető meg

Külön ki kell emelni, hogy a szerszámgyártás fejlesztését csak komplex módon lehet megvalósítani.

A tanulmányban javasolt kutatási témák maradéktalan végrehajtása és a komplexitás keretén belül ismertetett szempontok rendezése és hatékony megvalósítása képezheti csak alapját a szerszámgyártás további fejlesztésének.

IRODALOM

1. KANNAPPAN, A.: *Met. Forming*, **36** (1969), 335–343.
2. GILLEMOT, L.: *Metallurgie et constr.*, **101** (1969), 6–7, 324, 333–340.
3. URANC, F.: *Materialprüfung*, **12** (1970), 7–13.
4. KANNAPPAN, A.: *Met. Forming*, **37** (1970), 6–14.
5. RÜCKERL, E.: *Arch. Eissenhüttenwesen*, **38** (1967), 41–47.
6. FRITZSCH, G.–KÖGEL, H.: *Neue Hütte*, **12** (1967), 360–365.
7. ARTINGER, I.: *Periodica Polytechnica*, **15** (1971), 323–329.
8. ARTINGER, I.: VI. Hüttenmännische Materialprüfer-Tagung. Vorträge II. Balatonszéplak (1971), 280–285.
9. BUNGARDT, K.–MÜLDERS, O.–SCHMIDT, W.: *Stahl u. Eisen*. **79** (1959), 1258–1263.
10. SZAMARIN, A. M.: The Uses of Vacuum in Metallurgy, London 1964.
11. TAUSCHER, H.–FLEISCHER, H.: *Neue Hütte*, **8** (1963), 326–329.
12. LANPHIER, B. T.: *Metal Progress*, **90** (1966), 91–92.
13. BUNCHAB, F. F. et al.: *J. Metals*, (1967), 35–39.
14. WEISS, CH.–SCHARF, G.: *Die Technik*, **21** (1966), 314–319.
15. HEGEDÜS, Z.: II. Konferenz über Werkzeuge und Werkzeugmaterialen Bd. 2., 381–387. Budapest (1971).
16. FARNASOV, G. A.–FILIPPOV: *Stal*. **27** (1967), 809–810.
17. RYKALIN, N. N.: *Stal*, **27** (1967), 806–809.
18. MEDOVAR: Elektroslakovüj Pereplav „Naukova Dumka" (1965).
19. *Stroj. Vyr.*, **18** (1970), 410–411.
20. MC. BROOM–SMITH, T. B.: I. S. I. Symposium on Materials for Metal Cutting. Scarborough, 1970. Apr.
21. *Werkstattstechnik* **60** (1970), 73.
22. OCHRIMENKO, JA. M.–MIRONOV, L. N.: *Kuznyecsno Stamp. Prov.*, (1971), 7–8.
23. SMATKO, G. A.: *Metallurg.*, **12** (1967), 12–14.
24. VINOGRAD, M. I.: *Sztal*, (1970), 935–937.
25. PETRMAN, I.–HVORINOV, N.: *Sztal*, (1971), 132–133.
26. ZIMINA, L. N.: *Sztal*, (1971), 547–549.
27. WETZEL, W.–MÜLLER, H.: *Freiberg. Forsch. H.*, B sor. (1967), 221–222.
28. STROBICH, M.–STUHL, J.: *Aluminium*, **45** (1969), 679–681.
29. FIEDLER, H.–SPIES, H. J.: *Freiberg Forsch. H.*, B sor. (1967), 153–164.
30. HENTRICH, R.–OGIERMANN, G.: *Radex-Rdsch*, (1965), 623–646.
31. EFIMENKO, JU. M.–MOVČAN B. A.–TICHONOVSKIJ, A. L.: *Stal*, **26** (1966), 230–232.
32. FIEDLER, H.: *Neue Hütte*, **9** (1964), 129–138.
33. PETER, W.–SPITZER, H.: *VDI-Zeitschrift*, **106** (1964), 1564–1571.
34. FÜSSL, A.: Z. *Wirtschaftl. Fertigung*, 1966, 457–460.
35. ARTINGER, I.: *Bányászati Kohászati Lapok* – Kohászat, **4** (1970), 159–163.
36. VASCSENKO, A. P.–MELNYICSENKO, N. D.: *Metallovedenie termicseszkojo obrabatka* (1969), 12. 24–27.
37. KOEREVAAR, B. M.–KRAGTEN, H. J.–NEDERHAND, A. J. M.: *Metalen*, (1965), 72.
38. HANKE, E.–GRÖNER, R.: *Härterei-techn. Mitt.*, **19** (1964), 11–20.
39. WIEGAND, H.–CLAUSMEYER, H.: *Ind.–Anz.*, **86** (1964), 1227–1234.
40. BÜHLER, H.–HERRMANN, E.: *Arch. Eisenhüttenwesen*, **35** (1964), 1089–1095.
41. HANKE, E.–ZIEMER, A.: *Härterei-techn. Mitt.*, **22** (1967), 123–131.
42. HANKE, E.–ZIEMER, A.: *Härterei-techn. Mitt.*, **22** (1967), 197–204.
43. SCHERER, P.–KIESSLER, H.: *Stahl u. Eisen*, **63** (1943), 353–360.
44. FOPIANO, P. I.: *JISI*. **207** (1969), 220–224.
45. ARTINGER, P. J.: Előadás a Gépészkar 100 éves jubileumán 1971. okt.
46. ARTINGER, I.: II. Konferenz über Werkzeuge und Werkzeugmaterialen Bd. 1., 227–232. Budapest (1971).
47. KERLA, E. B.: *Journal of Metals*, **15** (1963), 755–762.
48. TELANG, Y. P.–CLARK, R.: *Metal Progress*, **90** (1966), 87–90.
49. BERNSTEIN, M. L.: Termomechanyicseszkaja obrabotka, Moszkva 1968.

50. TAMURA, J.—IBARAKI, M.—NOZAKI, H.: *Trans. Japan Inst. Metals*, **7** (1966), 248—252.
51. MARSCHALL, C. W.—GEHRKE, J. H.—SABROFF, A. M.—BOULGER, F. W.: *Metals*, **18** (1966), 328—336.
52. LATHA, M. D. J.: *JISI*, **208** (1970), 50—57.
53. WIEGAND, H.: *Härterei-techn. Mitt.*, **21** (1966), 255—262.
54. KUNZE, E.—BRANDIS, H.: *Draht-Welt*, **53** (1967), 178—181.
55. HOLTZ, F. C.—PARIKH, N. M.: *Metal Progress*, **90** (1966), 117—133.
56. SALJA, M. A.: *Kuznyecsno Stamp. Proizv* (1968), 47—48.
57. KNOTEK, O.: *Berg und Hüttenmännische Monatshefte*, (1968), 174—177.
58. KNOTEK, O.: *Industrie-Anzeiger*, 1967. szept. 1712—1713.
59. GLADKIJ, P. V.: *Avtomaticseszkaja Szvarka*, (1968), 9, 58—62.
60. KORRACH, M.—MEDNYANSZKI, R.: II. Szerszámanyagok és Szerszámok Konferencia Előadásai 1. Budapest 1971 9—16.
61. VLADÁR, T.: Uo. 35—42.
62. REYNOLDSON—HARRIS: The Vacuum Heat-treatment of Tod Steels ASM. Ohio USA.
63. NEMÉNYI, R.: Acélok hőkezelése vákuumban. II. Szerszámanyagok és Szerszámok Konferencia Előadásai 1. Budapest 1971, 77—86.
64. ETTENREICH, H.: *VDI-Zeitschrift*, **110** (1968), 316—320.
65. SWOBODA, K.—PATER, M.—SUTRICH, J.—BACHHEIMER, G.: *Berg. u. Hüttenm. Mh.*, **111** (1966), 512—522.
66. HABREREC, F.—SKAREK, J.: *Strojirenstvi*, **16** (1966), 282—287.
67. *Materials Engineering*, **70** (1969), 34—53.
68. YATES, D. H.—HAMAKER, J. C.: *Metal Progress*, **90** (1966), 75—78.
69. GREY, A. G.: *Metal Progress*, **90** (1966), 55.
70. CREMISIO, R. S.: *Metal Progress*, **90** (1966), 63—64.
71. THOMPSON, J. F.: *Tool Manuf. Eng.*, **54** (1965), 63—64.
72. FLETCHER, C. T.: *Metal Progress*, **90** (1966), 66—67.
73. STEVEN, GR.: *Tool Manuf. Eng.*, **58** (1967), 68—70.
74. BRAUN, H.: *Giesserei*, **56** (1969), 11.
75. HILLER, H. M.: *Giesserei*, **56** (1969), 545—551.
76. CSEH, M.—BÁNKI, T.: *Bányászati Kohászati Lapok*—Öntöde, **21** (1970), 261—266.
77. MARKÓ, J.: II. Konferenz über Werkzeuge und W.

Hot — Working Tool Steels. At first the present state of tool production in Hungary was analysed, pointing out to the insufficiencies and their main reasons. The significance of the up-to-date tool production on the economical manufacture is emphasised. The importance of this problem can be deduced also from the great number of published papers written about this matter. Elaboration and systematization of these helps to find the ways which lead to the production of tools of a better quality, a lower cost and a longer endurance. The authors give an account of some results of recent experiments in Hungary and on the base of these and of literary data make a suggestion of further research work.

Warmarbeitende Werkzeugstähle. Es wurde der jetzige Zustand der Werkzeugherstellung in Ungarn analisiert und auf die Unvollkommenheiten sowie deren Ursachen hingewiesen. Die Verfasser betonen die wichtige Rolle der zeitgemäßen Werkzeugherstellung in der wirtschaftlichen Erzeugung. Die Bedeutung dieses Problems kann auch durch die zahlreiche Veröffentlichungen in der Fachliteratur unterstrichen werden. Mit Hilfe der Bearbeitung und Systematisierung dieser Daten können jene Richtungen festgesetzt werden, die im Interesse von qualitativ hochwertigen billigeren und haltbareren Werkzeugen in aller Welt entwickelt wurden. Es wurden über die Ergebnisse heimischer Versuche berichtet und bezüglich der Forschungstätigkeit in der Zukunft auf Grund der Erfahrungen sowie der Übersicht der Literatur Vorschläge gemacht.

A SZERSZÁM ÉS ANYAG KÖLCSÖNHATÁSA A FORGÁCSOLÁSBAN

HELYZETKÉP*

KAZINCZY LÁSZLÓ**
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

[Beérkezett 1972. május 31.]

Ez a tanulmány a téma két tényezőjeként a szerszám forgácsolóképességét és a munkadarab anyagának forgácsolhatóságát jelöli meg, egyben a gazdaságos gyártás és fejlesztéssel kapcsolatban mindkét tényező technológiai jelentőségét ismerteti. Mindenekelőtt a gyorsacél és keményfémes forgácsolószerszámok forgácsolóképességének egységes módon való meghatározását tartja szükségesnek. Ennek a célkitűzésnek a 4. ötéves terv keretében való megvalósítására részletes munka- és ütemtervet közöl.

1. Célkitűzés

A szerszám és anyag kölcsönhatását a forgácsolásban a szerszám forgácsolóképessége és az anyag forgácsolhatósága jellemzi. Az ezen témakörrel foglalkozó, az Elméleti Technológiai Akadémiai Bizottság által megbízott munkabizottságnak a 4-ik ötéves terv végére befejezendő célkitűzése: a hazai gyorsacél és keményfém forgácsoló szerszámok forgácsolóképességének vizsgálata a szerszám főbb paramétereinek függvényében. A munkabizottság a forgácsolhatósági vizsgálatokkal kapcsolatos kutatásokat csak a forgácsolóképességi vizsgálatok befejezése utáni időben tervezi megkezdeni.

A forgácsolóképesség a forgácsoló szerszámoknak az a tulajdonsága, mely azt anyagi összetétele, hőkezelése és élgeometriája révén a forgácsolás technológiai adatainak gazdaságos alkalmazásával a forgácsolásra alkalmassá teszi.

A forgácsolóképességet leggyakrabban a forgácsoló szerszám éltartamával mérjük, mely általában arról ad felvilágosítást, hogy a vizsgált forgácsoló szerszám éle a forgácsolási sebesség vagy más paraméter függvényében milyen elváltozást szenved.

* Ezt a helyzetképet az MTA Elméleti Technológiai Bizottság által kiküldött munkabizottság állította össze és terjesztette az Elméleti Technológiai Bizottság elé, amely azt megvitatta és jóváhagyta.

** Prof. Dr. Kazinczy László, Budapest XI., Mányoki út 24.

2. A forgácsolóképességi kutatások jelentősége

Hazai gépgyártásunk gazdaságos termelékenységének forgácsoló szerszámaink minősége és teljesítménye egyik fontos tényezője. Ezért az e téren mutatkozó hiányosságok sürgős intézkedéseket követelnek. Az ilyen irányú munka összhangban van az MSZMP KB-nak a Párt X. Kongresszusán kiadott irányelveivel, mely szerint a szocialista gazdaság vezetőinek kötelességük a Párt gazdaságpolitikájának megvalósítására mindent megtenni. A Kormány távlati gazdaságpolitikája ugyancsak a gépipari termelékenység fokozását sürgeti.

A forgácsoló szerszám gyakorlati értékét a szerszám forgácsolóképessége képviseli. Ennek vizsgálata és megállapítása legtöbbször éltartamvizsgálatokkal történik. Ilyen vizsgálatokat különböző módszerekkel világszerte már legalább 75 éve végeznek. A kutató laboratóriumoknak és termelő üzemeknek azonban egyaránt *egységes* vizsgálati eljárásokra van szükségük. A vonatkozó előírásoknak figyelembe kell venniök az éltartamot befolyásoló paramétereket. Ilyenek: az anyagösszetétel, a hőkezelés, a szövetszerkezet, az élgeometria, a forgácsolási feltételek, a gép és munkadarab merevsége, a gép teljesítménye, az éltartam végét jelentő kritériumok, az éltartamot befolyásoló hűtő-kenőfolyadék összetétele stb.

A forgácsoló szerszám forgácsolóképességének gazdasági jelentőségét a gyorsacél és keményfém forgácsoló szerszámanyagok évi fogyasztása is erősen kihangsúlyozza. Ezért a teljesítményhez viszonyított évi szerszámanyag-fogyasztásunk csökkentésére kell törekednünk.

Forgácsoló szerszámanyag-fogyasztásunk nagysága — mely népgazdaságunk jelentős tétele — nagymértékben a minőség függvénye, melynek vizsgálata a fejlesztés egyik alapfeltétele. Az egységes vizsgálatra irányuló nemzetközi és hazai kutatások határozott irányban haladnak, de még nem teljesen kiforrottak. Ha a kutatások megfelelő ütemben való folytatása biztosítva lesz, akkor remélhető, hogy az egységes vizsgálati módszerek a 4-ik ötéves terv idején belül rendelkezésünkre fognak állani.

3. A forgácsolóképességi vizsgálatok hazai és külföldi helyzete

3.1. A forgácsolóképességi vizsgálatok hazai helyzete

A hazai gyorsacél-gyártás és fogyasztás az 1930-as években már nagyobb lendületet vett. A különböző hazai minőségek osztályozása és a kereskedelemben forgalomba hozott minőségekkel való összehasonlítása forgácsolóképességi vizsgálatokat tett szükségessé, melyeknél akkor még kizárólagosan az él teljes tönkremenetelének kritériumát alkalmazták. Ilyen kísérleteket az 1930-as és az

1940-es években főleg a MÁV és a MÁVAG budapesti és diósgyőri üzemeiben végeztek.

A forgácsolóképességi kutatásokkal kapcsolatban az 1950-es években nálunk két főkutatási hely alakult ki, az egyik a Budapesti Műszaki Egyetem Gépgyártástechnológia Tanszéken, a másik az akkori Gépipari Technológiai Intézetben, amelynek jelenlegi jogutódja a Vasipari Kutató Intézet. Az 1950-es évek forgácsolási kutatásainak egyik eredménye az MSZ 2663—53. és az MSZ 4356—55. szabvány. Az első az acélok forgácsolhatóságával, a másik a gyorsacél forgácsolási vizsgálataival foglalkozik.

Az 1960-as években forgácsolási kutató helyeink száma az NME Szerszámgép Tanszéke, az NME Gépgyártástechnológia Tanszéke, a Szerszám és Gépelemek Gyára és a Gépipari Technológiai Intézet kutató helyeivel bővült.

Az NME Szerszámgépek Tanszékén végzett kutatások között a gyorsacélok forgácsolóképességi vizsgálatai figyelemre méltók. Ezek a Lenin Kohászati Művek fejlesztési programjához kapcsolódnak.

A Szerszám- és Gépelemek Gyárában a keményfémek forgácsolóképességi vizsgálatai folynak.

A Gépipari Technológiai Intézet a munkálhatósági kérdéseken kívül intenzíven foglalkozik az NC-gépek gazdaságos éltartam-kérdéseivel is.

3.2. A forgácsolóképesség vizsgálatának helyzete a Szovjetunióban

A szocialista országokban végzett forgácsolóképességi és forgácsolhatósági elemző kutatások közül mind terjedelemben, mind eredményesség tekintetében a Szovjetunióban végrehajtottak a legfontosabbak. E nagy terjedelmű kutatások egyben a szocialista országok forgácsolási problémáira is rávilágítanak. Ezért a hazai kutatások mellett e keretben elegendőnek tartjuk a Szovjetunió kutatásainak irányait és főbb megállapításait ismertetni.

A publikált és hozzáférhető tanulmányok többségének fogalomalkotásában a forgácsoló szerszám forgácsolóképessége a munkadarab anyagának a szerszám forgácsoló részére gyakorolt koptató hatásában, az ún. éltartamban nyer értelmezést. A forgácsolási kutatások egyik legfontosabb célkitűzése a forgácsoló szerszámok forgácsolóképességének az éltartam növelésével való fejlesztése.

Meghatározott anyagú munkadarab forgácsolásakor a kísérleti szerszám forgácsolóképessége a szerszám anyagától, méretétől, élkiképzésétől, hőkezelés utáni szövetszerkezetétől és az alkalmazott hűtő-kenő folyadék minőségétől függ. A Szovjetunióban végzett forgácsolóképességi kutatások során a felsorolt paraméterekkel kapcsolatban az éltartam viselkedését részletesen megvizsgálták. A vizsgálatokat jellegük szerint két csoportba osztották: üzemi- és teljes forgácsolóképességi vizsgálatokra.

Az üzemi forgácsolóképességi vizsgálatok célja annak eldöntése, hogy adott igényeket kielégítő szerszám a rendelkezésre álló gyártási adottságokkal milyen anyagból készítendő a termelékenység és gazdaságosság biztosítására.

A forgácsolóképesség teljes vizsgálata a különféle forgácsoló megmunkálásoknál alkalmazandó szerszámok összes paramétereit figyelembe veszi.

Igen jelentősek azok a szovjet kutatások, amelyek kimutatták, hogy adott szerszámanyag és adott megmunkálandó anyag esetében a paraméterek változtatásával a vonatkozó összefüggés hatványai törvényszerűen változnak:

$$v = \frac{C_v}{T^{m=f(T,f,e)} f^{x_v=f(T,f,e)} e^{y_v=f(T,f,e)}}$$

ahol v — a forgácsolási sebesség,
T — a szerszám éltartama,
f — a fogásmélység,
e — az előtolás.

A szovjet forgácsolási kutatásokban jelentős az a megállapítás is, mely szerint a forgácsolási sebesség, és a szerszám-éltartam összefüggés a minőségileg eltérő kopásformák miatt esetenként igen bonyolult formákat ölt és a log$T$ — log v diagramok számos olyan fajtája jelentkezik, amelyekben e két paraméter kapcsolata nem lineáris.

Az új összetételű gyorsacélfajták, a forgácsoló keményfémek, valamint a keramikus és gyémánt forgácsoló szerszámanyagok és azok fejlesztése a Szovjetunióban ma már igen széles körű forgácsolási kutatásokhoz vezetett.

3.3. A forgácsolóképességi vizsgálatok helyzete a nyugati (tőkés) országokban

A nyugati országokban a forgácsolóképességet és a forgácsolhatóságot is magában foglaló komplex formában *a megmunkálhatóság* (Machinability) fogalmával értelmezik. Ennek lényege, hogy a J-vel jelölt megmunkálhatóságot vagy a hátkopás, vagy a kráteres kopás mérésével határozzák meg a v_{T20} vagy a v_{T60} ún. 20 perces éltartamot, ill. a 60 perces éltartamot biztosító forgácsolási sebességek arányával. E szerint a megmunkálhatóság képlete hosszú forgácsolási kísérletekkel megállapított 20 perces éltartam esetében:

$$J = \frac{v_{T20} \text{ a vizsgált anyagnál}}{v_{T20} \text{ a bázis-anyagnál}} .$$

Az USA-ban bázisanyagként az ALSI B1112 hidegen húzott acélt jelölték meg, melynél a J értéke 100. Ebből következik, hogy minden olyan esetben, amikor a megmunkálhatóság az ALSI B1112 anyagénál rosszabb, akkor $J < 100$.

A hosszú forgácsolási kísérletekkel meghatározott éltartamot költséges volta miatt a nyugati országokban az iparban csak ritkán alkalmazzák. Helyette valamely „rövidített" vizsgálattal meghatározott v_{T20} vagy v_{T60} értékkel számítják a megmunkálhatóságot. A legtöbbször használt rövidített éltartam-meghatározás a keresztesztergálás módszere.

A megmunkálhatóságot jellemző kutatások területén — amelyekben a forgácsolóképességi kutatások is bennefoglaltaknak — nyugaton az ISO (International Organization for Standardization) és a CIRP (Collège International pour l'Étude Scientifique de Technique de Production Mécanique) tevékenységében jutnak leginkább kifejezésre.

A megmunkálhatóság problémájának megközelítése és egységes megoldása Európában és az USA-ban is más-más elgondolásokba ütközik. Ezt igazolja az az akadémikus vita, mely az ISO javaslata körül már 4 éve folyik.

4. Az ISO forgácsolási tervjavaslata

Egységes forgácsolási előírásokat, melyek a forgácsoló szerszámok forgácsolóképességi előírásait is magukban foglalják, eddig sem hazánkban, sem külföldön még nem vezettek be. Erre az utóbbi években az ISO Műszaki Bizottsága dolgozott ki tervjavaslatot, melyet Munkabizottságunk a hazai forgácsolóképességi vizsgálati előírások kidolgozásakor alapként javasol felhasználni. Ezért az ISO-tervjavaslatot a következőkben főbb részleteiben ismertetjük.

Az ISO-tervezetben megadott vizsgálati előírások acélnak és öntöttvasnak gyorsacél- és keményfémlapkás-esztergakéssel való forgácsolására vonatkoznak, de megfelelő módosításokkal más anyagok forgácsolására is alkalmazhatók. A tervezet nem vonatkozik átvételi vizsgálatokra. Főbb rendelkezései a következők:

4.1. A munkadarab anyaga

Amikor a szerszám a kísérleti változó, vagyis amikor a szerszám forgácsolóképességét annak valamely paramétere függvényében vizsgáljuk, akkor a munkadarab anyaga C45-jelzésű acél, ill. 200÷220 HB-keménységű öntöttvas. A munkadarab befogására és a kísérletekkel összefüggő mérésekre a tervezet részletes előírásokat ad.

4.2. A forgácsoló szerszám

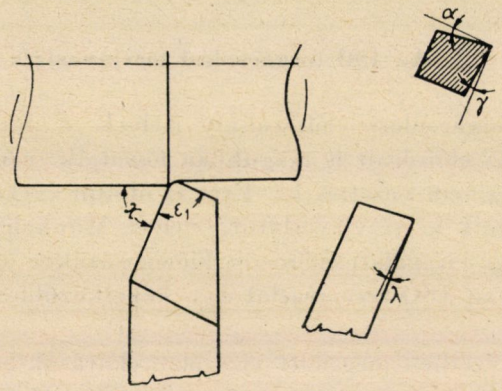
Ha a szerszám forgácsolóképességét vizsgáljuk, akkor a kísérleti jegyzőkönyvben fel kell jegyezni a szerszámanyag megnevezését, kémiai összetételét,

mikroszerkezetét, keménységét és a szerszám élgeometriáját. A zsugorított keményfém-szerszámok betétlapkás kivitelűek legyenek.

Ha a szerszám forgácsolóképességét vizsgáljuk, és az élgeometria a kísérleti változó, akkor figyelembe kell venni az ISO-ajánlásnak erre vonatkozó feltételeit (I. táblázat és 1. ábra).

I. táblázat

A szerszám anyaga	Homlokszög γ	Hátszög α	Terelőszög λ	Elhelyezési-szög $\varkappa$	Csúcsszög ε_r
gyorsacél	25°	8°	0°	75°	90°
kemény-fém	+6°	5°	0°	75°	90°
	−6°	6°	+6°	75°	90°



1. ábra. A kísérleti kés élgeometriája.

A forgácsolóképességi vizsgálatokra egyenesnagyoló esztergakést kell használni. A kísérleti szerszám szárának és szerszámtartójának méreteire, kivitelére, tűréseire, felületi kikészítésére és újraélezésére az ISO-tervjavaslat részletes előírásokat tartalmaz.

A forgácsolóképességi vizsgálatokra használt eszterga megfelelően merev konstrukciójú és elegendő teljesítményű legyen. Kívánatos, hogy a gép fordulatszáma fokozatmentesen legyen szabályozható.

Minden forgácsolóképességi kísérletet vagy szárazon, vagy az ISO-tervjavaslatban meghatározott hűtő-kenő folyadék alkalmazásával kell végezni.

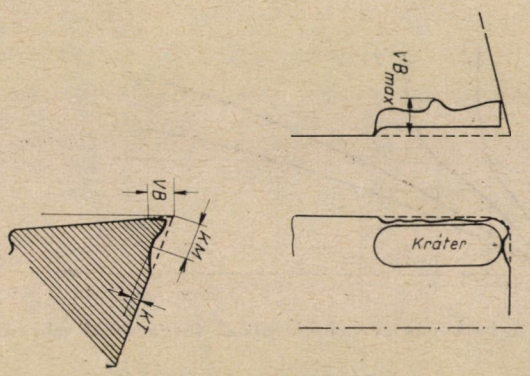
4.3. A forgácsolóképességi vizsgálat

Az összes kísérleteknél, amelyeknél az előtolás és a fogásmélység nem kísérleti változó, a forgácsolási feltételek a következők:

előtolás (e mm/ford.) 0,1, 0,25, 0,4, 0,63, tűrés $\pm 3\%$,
fogásmélység (f mm) 1,0, 2,5, 2,5, 2,5, tűrés $\pm 5\%$

Megfelelő pontos középértékek elérésére minden forgácsolási sebességgel legalább 3 kísérletet kell végezni.

A forgácsolási sebességet úgy kell megválasztani, hogy az éltartam a legnagyobb sebességnél is legalább 5 perc legyen. Nehezen forgácsolható anyagok forgácsolásakor a minimális éltartam 2 perc.



2. ábra. Az esztergakés kopása.

A forgácsolási sebességet a munkadarab forgácsolandó felületére kell vonatkoztatni.

4.4. Szerszámkopás és szerszám-éltartam

Gyorsacél szerszámoknál az előnyben részesített kopás-kritérium az él teljes tönkremenetele.

Zsugorított keményfém forgácsoló szerszámoknál a kopás-kritérium acél és öntöttvas forgácsolásakor $VB = 0{,}3$ mm, ha a kopási szalagszélesség egyenletes, és $VB = 0{,}5$ mm, ha a szalagszélességnek kiugró részei vannak (2. ábra).

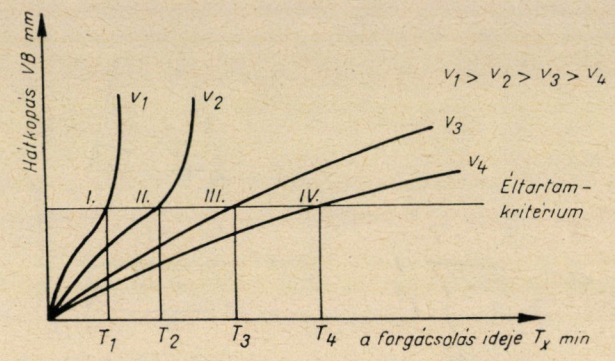
A kísérleteknél az alábbi kopási kritériumok is alkalmazhatók: *a)* gyorsacél szerszámhoz a $VB = 0{,}3$ egyenletes hátkopási szalagszélesség vagy $VB = 0{,}5$ mm maximális hátkopási szalagszélesség; *b)* keményfém forgácsoló szerszámok esetében a kopási kritérium a KT krátermélység, melyet a következő képlettel számítunk: $KT = 0{,}06 + 0{,}3\,e$, ahol e az előtolás mm/ford.

A VB kopási szalagszélességet a főforgácsolóél eredeti helyzetétől kell mérni.

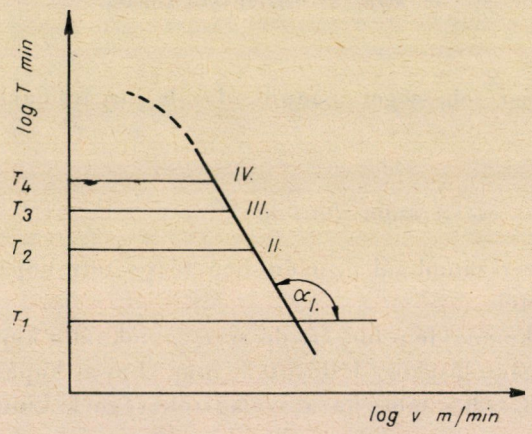
A KT krátermélységet mindenkor mint a kráterfenék és az eredeti homlokfelület közti maximális távolságot mérjük.

A különböző forgácsolási sebességeknél végzett hátlapkopási és időmérések a 3a. ábrán látható görbéket adják, a 4a. ábrán látható kopási görbéket pedig a kráteresedés mérésével kapjuk.

A 3b. és a 4b. ábrák a 3a. és a 4a. ábrák alapján a T éltartamot a v forgácsolási sebesség függvényében logaritmikus léptékben ábrázolják. Ezekben a T—v görbék bizonyos sebességtartományban lineárisnak tekinthetők.



3a. ábra. A hátkopás görbéi különböző forgácsolási sebességeknél.

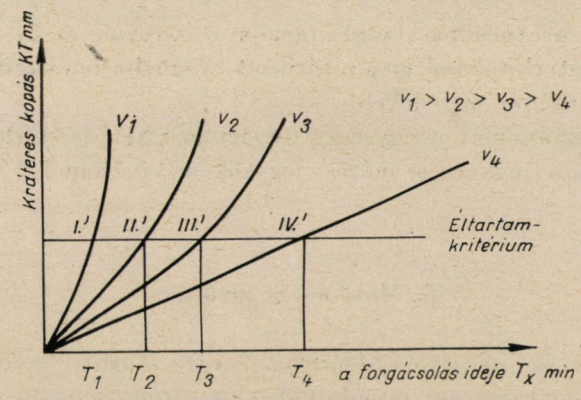


3b. ábra. A 3a. ábra alapján a T-éltartam a v forgácsolási sebesség függvényeként logaritmikus léptékben ábrázolva.

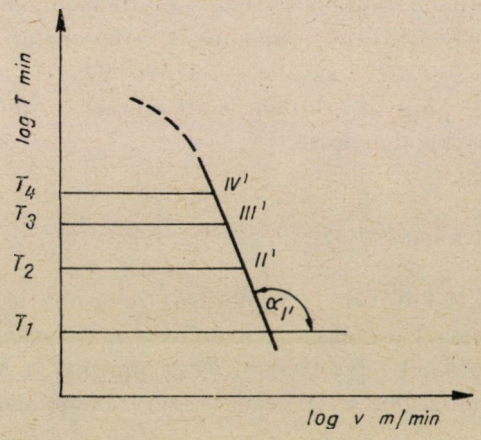
A 3b. és a 4b. éltartamgörbék lineáris szakaszára a következő egyenlet írható fel:

$$vT^{-1/k} = C,$$

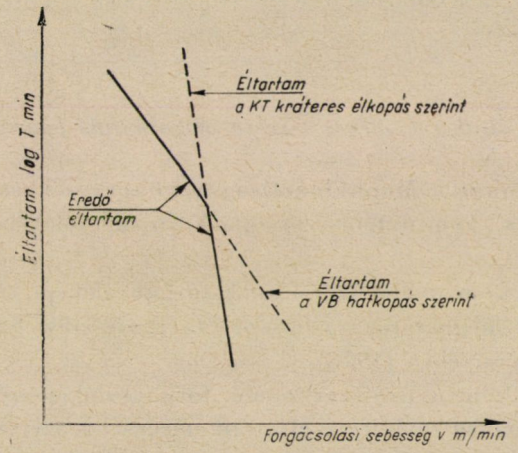
ahol v = a forgácsolási sebesség m/min,
T = az éltartam percekben,
k = tg α,
C = állandó.



4a. ábra. A kráteres kopás görbéi különböző forgácsolási sebességeknél.



4b. ábra. A 4a. ábra alapján a T-éltartam a v forgácsolási sebesség függvényeként logaritmikus léptékben ábrázolva.



5. ábra. A hát- és kráteres kopás kombinált vT-görbéje.

A hát- és kráterkopás kombinációjával kapjuk az 5. ábrán ábrázolt vT-görbét. A kráterkopással meghatározott vT-görbe rendszerint a hátkopással kiértékelt görbénél meredekebb.

Az ISO-tervjavaslat az egységes forgácsolási kísérletek előírt és megállapított értékeinek feljegyzésére mérési jegyzőkönyvi űrlapokat rendszeresített.

5. Munka- és ütemterv

„A szerszám és anyag kölcsönhatása a forgácsolásban" című téma kutatási terve a forgácsoló szerszám forgácsolóképességének — a forgácsolásra való alkalmasságának — feltételeit vizsgálta. Megállapítást nyert, hogy erre jelenleg alkalmas beföldi és külföldi véglegesített vizsgálati módszer még nincsen. Forgácsoló szerszámanyag-gyártásunk, valamint a felhasználás nemzetgazdasági szempontjai olyan egységes vizsgálati eljárást igényel, amelynek elvi meghatározásai alapján egy, a gyakorlatban is alkalmazható forgácsolóképességi vizsgálati módszer is kidolgozható.

5.1. A témával foglalkozó kutatóhelyek

A Munkabizottság két kutatóhely felállítását javasolja: *a)* az egyiket a BME Gépgyártástechnológia Tanszékén a keményfém-szerszámanyagok forgácsolóképességei vizsgálatainak elvégzésére; *b)* a másikat a Miskolci NME Gépgyártástechnológia Tanszékén a gyorsacél szerszámanyagok forgácsolóképességének vizsgálatára.

A két kutatóhely a részfeladatokat koordinálja, és munkájához a szükséghez mérten a többi egyetemi tanszéket, valamint egyes ipari és tudományos kutatóhelyeket is felkéri.

5.2. A két kutatóhely által a 4. ötéves tervben megoldandó feladatok

A kutatási munkát a Munkabizottság a következőkben jelöli meg:

A gyorsacél és keményfém-szerszámok forgácsolóképességének elvi meghatározása (1972).

A gyorsacél és keményfém-szerszámok forgácsolóképességi mérőszámának elvi és gyakorlati meghatározása hosszú éltartammméréssel a szerszám főbb paramétereinek függvényében (1972).

A gyorsacél és keményfém-szerszámok forgácsolóképességi mérőszámának üzemi meghatározása rövidített éltartammméréssel a szerszám főbb paramétereinek függvényében (1973).

A jelenlegi és a 4. ötéves terv ideje alatt gyártott hazai gyorsacél és keményfém forgácsoló szerszámanyagok forgácsolóképességének meghatározása, osztályozása és a külföldi minőségekkel való összehasonlítása (1974).

A forgácsolóképességi kutatásoknál a Munkabizottság a legújabb ISO-tervjavaslatot javasolja figyelembe venni.

Situation Report on „The Mutual Action of the Tool and the Material in Machining". This paper is a report which designates as the two factors of the subject the machining capacity of the tool and the machinability of the workpiece material. In connection with economical production and development the technological importance of both factors is dealt with. First of all an unified method for the determination of the machining capacity of rapid steel and of carbide machining tools is needed. The review presents a detailed working program and time table for realizing these aims during the 4th Five Years Plan.

Situationsbericht „Wechselwirkung des Werkzeugs und des Werkstoffs bei der Zerspanung". Diese Studie ist ein Situationsbericht, der als die zwei Komponenten des Themas die Zerspanungsfähigkeit des Werkzeugs und die Zerspanbarkeit des Werkstoffs bezeichnet. Im Zusammenhang mit der wirtschaftlichen Fertigung und Entwicklung wird auch die technologische Bedeutung beider Faktoren besprochen. Vor allem ist die einheitliche Bestimmung der Spanungsleistung von Zerspanwerkzeugen aus Schnellstahl und aus Hartmetall notwendig. Der Situationsbericht bringt einen detaillierten Arbeits- und Terminplan für die Verwirklichung dieser Zielstellung im Rahmen des 4. Fünfjahrplans.

IMPULZUS ÜZEMŰ TERMIKUS LETÖRÉS VIZSGÁLATA Ge-BAN ÉS Si-BAN

HENK KÁROLY* és PATAKI GYÖRGY**

MTA MŰSZAKI FIZIKAI KUTATÓ INTÉZET, BUDAPEST

[Beérkezett: 1971. július 28-án]

A jelen dolgozatban a termikus letörések egy speciális esetét tárgyaljuk, azt amikor egy anyagba az energiát olyan gyorsan tápláljuk be, hogy a hőelvezetés elhanyagolhatóvá válik. Ha az ily módon betáplált hőenergia egy kritikus értéket elér, akkor impulzus üzemű termikus letörés következik be. E letörés elméletének rövid ismertetése során megmutatjuk, hogy a kritikus hőenergia független az alkalmazott impulzus időtartamától. A Ge és Si mintákon fűrészfog alakú feszültség impulzusokkal végzett kísérleti mérések kvalitatív egyezést adtak az elmélettel. A kritikusnál nagyobb energiák esetében megolvadt felületi szálakat figyeltünk meg, amelyeknek gyakorlati alkalmazására is mód van.

Jelölések

Q_c = kritikus hőmennyiség,
I_c = kritikus áramerősség.
U_c = kritikus feszültség,
t_c = impulzushossz (idő) (sec).
q = keresztmetszet,
d = hosszúság,
σ = vezetőképesség (fajlagos).
C_v = fajhő,
γ = fajsúly,
T_0 = környezeti hőmérséklet.
β = hőelvezetési tényező,
T_m = áramszál hőmérséklete,
P = betáplált teljesítmény.
I = áramerősség,
j = áramsűrűség,
n = elektron koncentráció,
p = lyukkoncentráció,
τ = tranziens időtartam.

1. Bevezetés

Az [1] dolgozatban, a *stacioner termikus letörés* esetét vizsgáltuk. Mind műszaki, mind fizikai szempontokat figyelembe véve, feltétlen érdekes az az eset, amikor a rendszerbe táplált hő az időtől explicite függ, s így a stacioner állapot nem tud beállni. Ha a letörés ilyen feltételek mellett megy végbe, *impulzus üzemű termikus letörésről* beszélünk [2], [3]. Különösen érdekes az a határeset, amikor a hő betáplálása olyan gyors, hogy a hőelvezetés a vizsgált időtartamban elhanyagolható. Ez az eset azzal jellemezhető, hogy a termikus letöréshez szükséges minimális Q_c hő, független lesz a használt impulzusok hosszától (t_c).

* Henk Károly, Budapest VIII., Hungária krt. 22–24/E.
** Pataki György, Budapest III., Kórház u. 29.

Egy másik letörés, az ún. magnetothermal pinch-effektus [4], melynél az elektron-lyuk gázban *pinch-effektus** lép fel, majd ezen áramszál mentén következik be a termikus letörés. Ezt a modellt az InSb-ban megfigyelt effektusokra dolgozták ki [4].

Jelen dolgozatban Ge-ban és Si-ban vizsgáljuk az impulzus üzemű termikus letörést, és meghatározzuk a Q_c (t_c) összefüggéseket, háromszög alakú impulzusokat használva.

A négyszög impulzusokkal végzett kísérletek során olyan effektust találtunk, mely igen hasonló volt a magnetothermal pinch esetében fellépő effektushoz: a mintán levő feszültségesés $\sim$ 1 μsec-os tranzienst mutatott. A Ge esetén ezt a jelenséget a kontaktusok enyhén injektálható hatására vezettük vissza. Ezzel megmutattuk, hogy a vizsgált hőmérsékleti tartományban a letörés tisztán termikus eredetű.

Háromszög alakú impulzusokat használva, elegendő nagy áramok mellett, mind Ge-ban, mind Si-ban, a minta felületén megfigyeltük az anyag megolvadását egy áramszál mentén. Ez a jelenség megfelel a termikus letörés elméletében használatos Wagner-féle csatornának [3], vagy ha az újabb terminológiát használjuk, az S-alakú karakterisztikáknál fellépő áramszál kialakulásának [5].

2. Az impulzus üzemű termikus letörés elmélete

Mielőtt a kísérleteket ismertetnénk röviden összefoglaljuk az impulzus üzemű termikus letörés és az ezzel kapcsolatos *magnetothermal pinch-effektus* elméletének néhány eredményét [2], [3], [4].

Egy q keresztmetszetű, d hosszúságú σ vezető képességű szálra írjuk fel a nem stacioner hővezetési egyenletet:

$$C_v \gamma q d \frac{dT}{dt} = -P_R + E^2 \sigma q d, \tag{1}$$

ahol C_v — a fajhő, γ — a vizsgált anyag fajsúlya, P_R — a radiális hőelvezetés. Mivel a feltevés szerint a hőbetáplálás gyors, P_R elhanyagolható, tehát:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\sigma E^2}{C_v \gamma} = \frac{\sigma_i \exp(-B/T) E^2}{C_v \gamma}. \tag{2}$$

* A pinch-effektus, mint ismeretes abban áll, hogy az áramot szállító töltéshordozók, az áram mágneses terének hatására koncentrálódnak.

Itt azzal az egyszerűsítéssel éltünk, hogy a vezetőképességet $\sigma = \sigma_i \exp(-B/T)$ alakban vettük fel.*

Tegyük fel, hogy a térerősség időben lineárisan nő a $(0, t_c)$ intervallumban:

$$E = \frac{E_c}{t_c} \cdot t. \tag{3}$$

A (3) segítségével a t kiküszöbölhető. A kapott egyenlet integrálása zárt alakban nem végezhető el.

Ha feltesszük, hogy a szál közepén $T_m > T_0$ hőmérsékletnek kell lennie ahhoz, hogy a letörés bekövetkezzék, akkor a (T_0, T_m), illetve a $(0, E_c)$ tartományra vett integrál közelítőleg azt adja, hogy:

$$E_c = \frac{1}{\sqrt{t_c}} \left(\frac{3\gamma C_v \cdot T_0^2}{\sigma_i B} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{B}{2T_0} \right). \tag{4}$$

A letöréshez szükséges összes hőt az (1) integrálásából kapjuk ($P_R = 0$), ha figyelembe vesszük [2], hogy a hőmérséklet változás a $(0, t_c)$ intervallumban T_0^2/B lesz:

$$Q_c = \frac{C_v \gamma q d \cdot T_0^2}{B}. \tag{5}$$

Amint fizikailag várható, az impulzus üzemű termikus letörésnél Q_c független az impulzus t_c hosszától.

Most röviden a magnetothermal pinch-effektus alapgondolatát ismertetjük [4]. A mintán átfolyó áram, saját mágneses tere miatt „pinchelődik". Ehhez elektronok és lyukak egyidejű jelenléte szükséges, különben az elektromos semlegességre való törekvés a pinchelődést megakadályozza.** A pinch-effektus igen rövid idő alatt (~ 50 nsec) létrejön a használt impulzus hosszakhoz képest, ha az ún. Benett-féle kritérium teljesül azaz, ha

$$kT = \mu e P / 4c^2, \tag{6}$$

ahol T — a kétféle töltéshordozók hőmérséklete, $\mu = \mu_n + \mu_p$ mozgékonyságuk összege, P — az egységnyi plazmahosszra bevitt teljesítmény, c — a fénysebesség.

* Pl. Ge esetében az egyeletekben szereplő paraméterek értéke a következő:

$\sigma_i = 3{,}82 \cdot 10^4\ \Omega^{-1}\ \mathrm{cm}^{-1}$ $\qquad$ $B = 4180\ ^\circ\mathrm{K}$,
$\gamma = 5{,}33\ \mathrm{gr\ cm}^{-3}$ $\qquad$ $C_v = 0{,}31\ \mathrm{J/gr} \cdot ^\circ\mathrm{C}$
$\beta = 0{,}63\ \mathrm{J/cm} \cdot \mathrm{sec} \cdot ^\circ\mathrm{C}$

** Valóban, ha a pinch-effektus révén pl. elektronokat akarunk eltávolítani a pozitív, *lokalizált* donorok környezetéből, úgy ezt az elektronok és ionizált donorok közötti Coulomb-féle vonzás fogja gátolni.

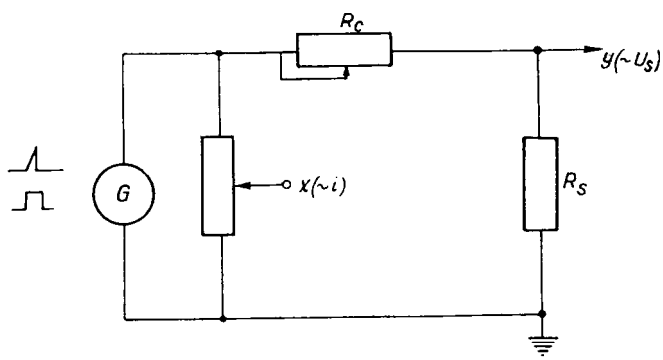
A fent említett rövid, mintegy 0,05 μsec után az áramszálban megnő a hőmérséklet, ami a minta megolvadásához vezethet az áramszál mentén. Ez a modell még nem adja meg a kialakult csatorna sugarát. Ezt meghatározhatjuk, ha feltesszük, hogy a csatorna kialakulás után az összes áram azon keresztül folyik. A mintán átfolyó áram: $I = r^2\pi j$, ahol j az áramsűrűség. Ebből

$$r = I(\pi\mu enP)^{-1/2} \tag{7}$$

adódik, mivel $j = ne\mu E$ és $P = IE$.
Könnyen belátható, hogy a pinch-effektusnál szokásos P teljesítmények mellett a hőelvezetés elhanyagolható. Valóban a radiális hőelvezetés $P_R = 2\pi\beta rdT/dr$ és pl. InSb esetén $\beta = 70/\mathrm{TW/cm}$. Ha a pinch-sugárnál nagyságrendi becslésként a $dT/dr \approx T/r$ értéket írunk, akkor $P_R \approx 0{,}44$ kW/cm adódik, ami mintegy ötödrésze a szokásos P értéknek. A (7) kifejezésben a rácsolvadás hőmérsékletének megfelelő μ és n értékeket írva $r \approx 2 \times 10^{-3}$ cm adódik. Mint látni fogjuk, esetünkben, a felületen megfigyelt csatorna is hasonló sugarú, annak ellenére, hogy a kísérletek azt mutatják, hogy nem magnetothermal pinch-effektus következik be Ge és Si esetén.

3. A vizsgálati módszerek leírása

A vizsgálatok során fűrész alakú és négyszög alakú impulzusokat használtunk, mivel ezek együttes alkalmazása lényegesen több információt nyújt a fellépő jelenségekről, mint bármelyik módszer külön-külön. A fűrészgenerátor 5, 10, 20, 50, 100 és 200 μsec felfutású lineáris feszültség jelet biztosít. A maximális feszültség 500 V és a legnagyobb kivehető áram 6 A. A berendezés leírását részletesen a [6]-ban közöltük. Az impulzusgenerátor négyszög alakú jelet ad az $1 \div 50$ μsec tartományban; 3 A-ig terhelhető, a maximális kimenő



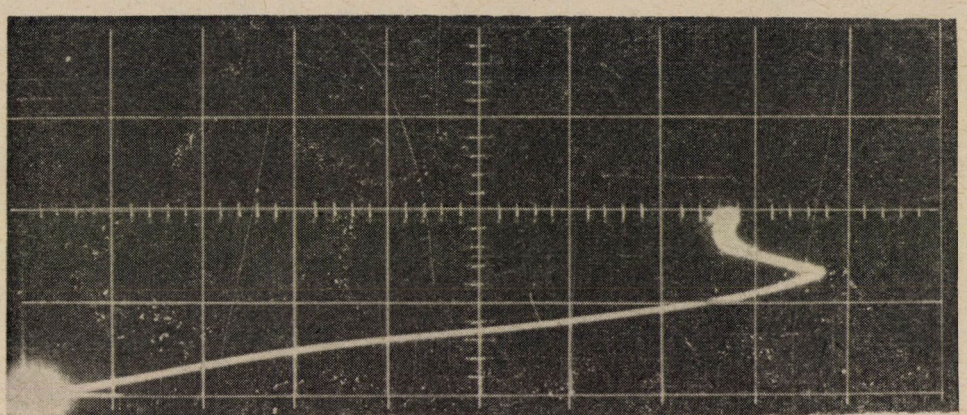
1. ábra. A mérőáramkör; G: generátor; R_c: áramkorlátozó ellenállás; R_s: a minta ellenállása ($R_c \gg R_s$).

feszültsége 3 KV. A vizsgálatokat általában áramgenerátoros üzemmódban végeztük az 1. ábrán látható elrendezésben.

A berendezések teljesítmény adatai lényegében meghatározták a használt minták méreteit: $6 \times 3 \times 0{,}4$ mm^3. A minták anyaga $5 \div 25$ Ω cm, fajlagos ellenállású n-típusú germánium és 1,5 Ω cm n-típusú szilícium. Bár ohmos jellegű kontaktusokat szándékoztunk készíteni, de mint látni fogjuk, az ohmosságtól való eltérés figyelembe vétele feltétlen szükséges. A kontaktusok felülete ≈ 1 mm^2 volt. A kísérleteket kétféle mintával végeztük: az *a* típusú minták a végeknél voltak kontaktálva, a *b* típusú minta szendvics elrendezésű volt. Mivel alacsony hőmérsékleten és különösen a használt nagy áramoknál, a kontaktusok „ohmossága" romlik, a méréseket 300 és 400 °K között végeztük.

4. A kísérleti eredmények ismertetése

Az áram-feszültség karakterisztikákat a fűrész alakú feszültség impulzusok segítségével rajzoltuk fel, $5 \div 10$ Hz-es ismétlődési frekvenciával. Az összes vizsgált mintán, elérve egy meghatározott áram, ill. feszültség értéket, kialakult

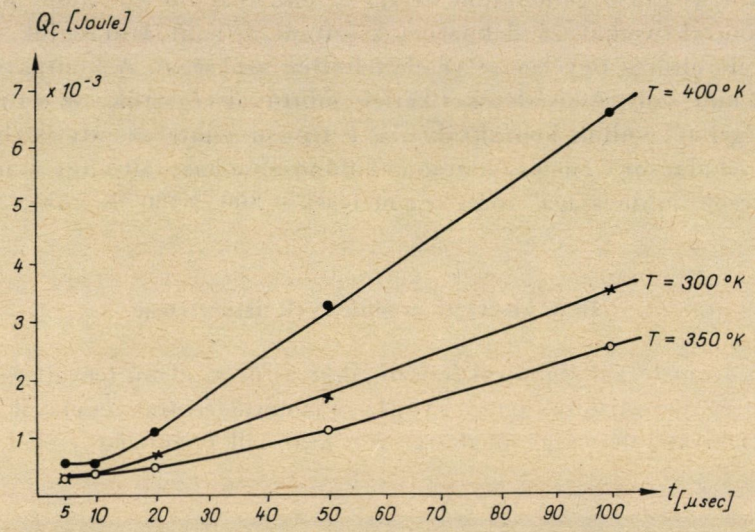


2. ábra. S-alakú I–V karakterisztika, felvétel oszcilloszkópról $t_c = 100$ μsec, függőleges: 3 A/osztás; vízszintes: 40 V/osztás.

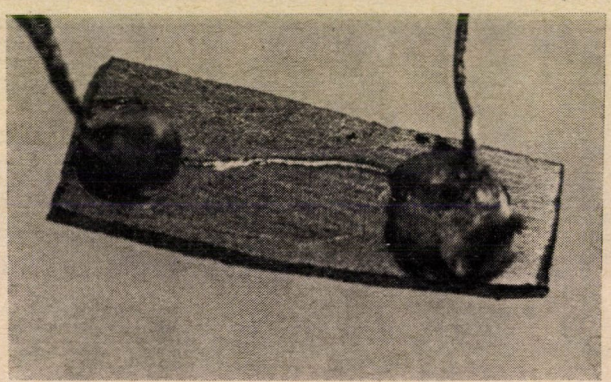
az S-alakú karakterisztika, amint azt a 2. ábra mutatja. A kritikus értékeket a $dU/dI = 0$ feltétel alapján határoztuk meg. A minták kímélése céljából, a mintán átfolyó áramot $I \leq I_c$ értékig növeltük csak, azaz általában nem engedtük létrejönni az S-karakterisztika negatív szakaszát.

Néhány esetben a karakterisztikán több negatív szakasz volt látható. Ilyenkor mindig a kisebb értékeknél fellépő negatív karakterisztikát vettük tekintetbe.

A 3. ábrán tüntettük fel a különböző felfutási idejű impulzusok mellett a negatív karakterisztika megjelenéséhez szükséges Q_c hőmennyiséget, amelyet közelítőleg a $3Q_c = I_c U_c \cdot t_c$ összefüggés alapján határoztuk meg, ahol t_c a felfutási idő. Látható, hogy csökkenő impulzus-hosszal ez az érték közel állandó



3. ábra. Az S-alakú karakterisztika megjelenéséhez szükséges betáplált hőmennyiség kritikus értéke (Q_c) az impulzus szélesség függvényében.



4a. ábra. Megolvadt csatorna a felületen (Sn kontaktusok között) germániumon (nagyítás 15-szörös).

lesz. A fenti méréseket nemcsak a szendvics elrendezésű mintákon végeztük el, hanem az *a* típusú mintákon is. Ezeknél tapasztaltuk, hogy ha a bevitt Q_c hőmennyiséget a kritikus érték fölé emeltük, akkor a minta felületén szemmel látható módon megindult egy $r \approx 2 \cdot 10^{-3}$ cm sugarú csatorna

kialakulása és terjedése az anódtól a katód felé. Az impulzus ideje alatt az anyag-megolvadás megfigyelhető volt. Ge esetén egy kialakult csatorna nagyított képe a 4a. ábrán látható. Rendszerint egyetlen csatorna alakul ki, azonban megfigyeltünk olyan esetet, amikor két csatorna indult el az anódtól, azonban végül is csak az egyik haladt végig a mintán. A kapott r érték egyezésben van a [4]-ben a térfogati csatornákra kapott értékkel. A térfogati csatorna

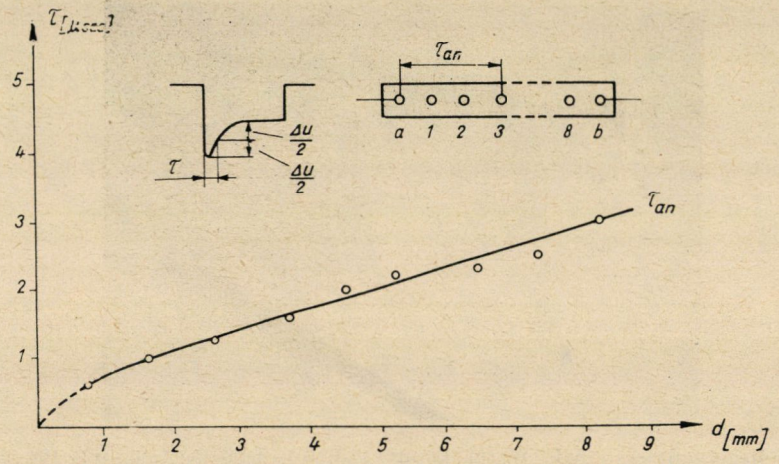
4b. ábra. Megolvadt csatornák (W-tűk között) szilícium felületén (nagyítás 100-szoros).

étezését a *b* típusú mintákon figyeltük meg oly módon, hogy a megfelelő teljesítmény alkalmazása után a kontaktusokat leszedtük, és azok alatt a csatorna kezdete, illetve vége megfigyelhető volt, anyagtranszport formájában. A csatorna láthatóvá tételére sósavas marószert használtunk, amely csak a kontaktusokat marta, a germániumot nem.

A 4b. ábra mutatja a Si felületen W-tűk között kialakult csatornák képét. Ezek kialakulását, a kísérletek szerint, a Si felületén levő oxidréteg megnehezíti (a tűhegyek a felületen gyakran átívelnek).

A továbbiakban a négyszög-impulzusokkal végzett kísérleteket ismertetjük. Áramgenerátoros üzemmódban mérve, a mintákon levő feszültség időbeli lefutásában egy τ időtartamú feszültségesés volt tapasztalható (5. ábra). Ez a jelenség igen hasonló a pinch-effektusnál fellépő feszültségeséshez, és az említett munkákban ezt tekintették a magnetothermal pinch-effektus létezése egyik bizonyítékának is. Az *a* típusú mintákon $\tau = 0{,}2 \div 1$ μsec, a *b* típusú minták esetében $\tau = 1 \div 2$ μsec volt. A feszültségesés eredetének és az S-alakú karakterisztikával való kapcsolatának megállapítására több ellenőrző kísérletet végeztünk. Megállapítottuk, hogy szobahőmérséklet felett (≈ 400 °K) a *b* típusú minta esetén a feszültség eloszlás homogén lett, más szóval, a kontak-

tusokon eső feszültségek elhanyagolhatókká váltak, és ugyanakkor a tranziens is eltűnt, míg az S-karakterisztika megmaradt, és az áramszál is kialakult. Ez arra utal, hogy a kontaktusok injektáló hatásáról van szó. Valóban ismeretes, hogy egy p—n átmenet nagy nyitó irányú áramoknál induktív viselkedést mutat l. pl. [7]. A [8] szerint ideális p—n átmeneten a diódán mérhető feszültség beállásának ideje a bázis-vastagsággal monoton nő. Speciálisan hosszú



5. ábra. A feszültség tranziens szélessége (τ) a távolság ($a-n$) függvényében, szobahőmérsékleten; $I = 0{,}4$ A.

mintán ($3 \times 10 \times 0{,}4$ mm^3) feszültség szondákat helyeztünk el a minta hosszában. Az a—n ($n = 1, 2 \ldots . b$) pontok között mérve a feszültség tranziensre a várt monoton összefüggés adódik (5. ábra). Extrapolálva a szendvics alakú mintára, a tranziens idejére helyes nagyságrend adódik.

5. Az eredmények diszkussziója és következtetések

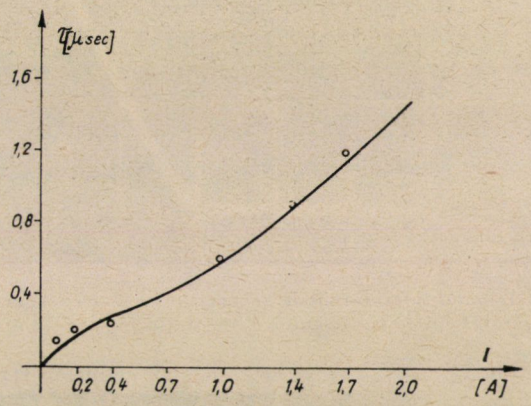
A vizsgálatok során először az impulzus üzemű termikus letörést kívántuk megvalósítani.

Mint a 3. ábrán látható, a vizsgált geometria és hőelvezetési feltételek mellett $t_c < 20$ μsec felfutású háromszög alakú impulzusnál ez teljesül, hiszen Q_c kritikus hőmennyiség az (5) képletnek megfelelően függetlenné vált t_c-től.

Érdekes, hogy $t_c > 20$ μsec esetén a $Q_c(t_c)$ görbék a vizsgált hőmérsékleti intervallumban nem lesznek a T_0 környezet hőmérsékletnek monoton függvényei. Ennek magyarázata, hogy ilyenkor közeledünk a stacioner termikus letö-

rés felé, amikor is, mint [1]-ben megmutatták, a letöréshez szükséges csúcsteljesítmény a hőmérséklet függvényében szélsőértéket mutat. $t_c < 20$ μsec esetén ez a jelleg csökken, de az (5) képletben szereplő T_0^2-es függést nem sikerült kimutatni.

A Q_c értékek meghatározásakor bizonytalanságot jelentett, hogy szobahőmérsékleten néha két letörés is megjelent az I—V karakterisztikán. Ilyenkor a kisebb Q_c értéket vettük figyelembe.



6. ábra. A feszültség tranziens (τ) az átfolyó áramerősség függvényében, szobahőmérsékleten.

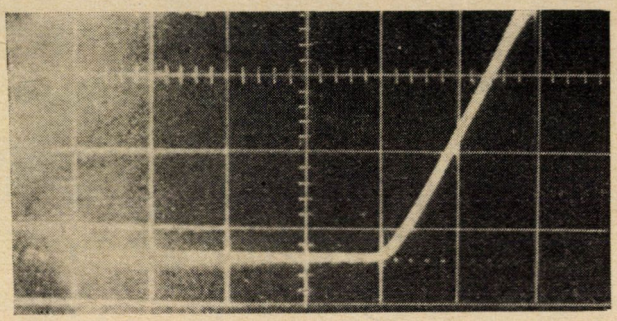
Mivel ez az effektus megszűnt szobahőmérséklet felett, és a Q_c (t_c) görbék jellege nem változott, az impulzus üzemű termikus letörés feltétele a vizsgált tartományban jó közelítéssel $t_c < 20$ μsec. A négyszög impulzusokkal kapott eredmények nem látszanak összeegyeztethetőknek a magnetothermal pinch-effektussal. Valóban, ha pl. Ge-ra alkalmazzuk a Benett-féle kritériumot, akkor a pinch-effektushoz mintegy 30 A szükséges (ha az elektronok drift sebességét 2×10^6 cm/sec-nek, hőmérsékletüket 0,03 eV-nak vesszük).

Másrészt a pinchelés ideje növekvő árammal csökken, ami ellentétes az általunk talált $\tau(I)$ összefüggéssel (6. ábra).

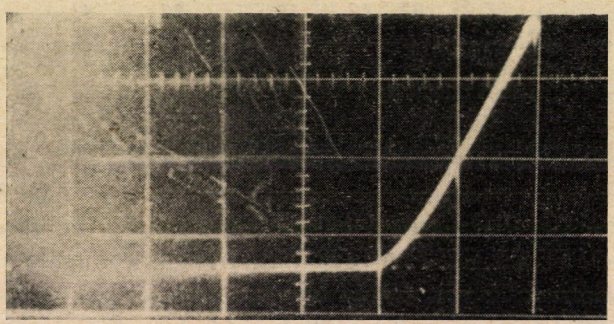
A kapott eredmények leginkább a p—n átmenetek induktív viselkedésével magyarázhatók. Ideális p—n átmenetnél már néhány száz mA-nál mutatkozik az induktív tulajdonság. Mivel az általunk használt kontaktusok „enyhén" injektálnak, a szükséges bázis ellenállás modulációhoz lényegesen nagyobb ($\sim$ 1A) áramok szükségesek.

Jóllehet az elmondottak Ge és Si mintákra vonatkoznak, célszerűnek látszik, mint arra a [9] rövid közleményünkben utalunk is, az InSb-on talált effektusokat ebből a szempontból megvizsgálni, mivel a feszültség tranziensek már viszonylag kis áramoknál is tapasztalhatók [10], amikor a pinch-effektus

fellépte még InSb-ban is kétséges.* A felületi csatornák kialakulása jól igazolja az S-karakterisztikáknál lehetséges áramszál kialakulást, jóllehet nem világos, hogy miért jön ki a felületre a csatorna, holott a térfogatban a minta hőmérséklete magasabb. Megjegyezzük, hogy térfogati áramszálat [4]-ben felületi áramszálat [12]-ben észleltek először. A felületi csatorna kialakulása valószínűleg kapcsolatban van a felületi vezetéssel, azonban eddig nem



7. ábra. Oszcilloszkóp felvétel a csatornából képzett $p-n$ átmenet áram-feszültség karakterisztikájáról. Léptékek: vízszintes 1 V/cm, függőleges: 20 mA/cm.



8. ábra. Ac 107 tip. tranzisztor bázis-emitter dióda áram-feszültség karakterisztikája. Léptékek: vízszintes 1 V/cm, függőleges 20 mA/cm.

sikerült egyértelmű korrelációt kapni a felületi kezelés és a csatorna kialakulásához szükséges teljesítmény között. Az áramszál kialakulása feltehetően lényegesen hamarabb megkezdődik, mint a Ge vagy Si megolvad. Si esetén a megolvadt szál a látható tartományban világít.

* Újabban [11]-ben a W-n-Ge kontaktus záró irányú áram-feszültség karakterisztikájában észlelhető negatív differenciális ellenállású szakasz elméletét dolgozták ki. Ennek a modellnek alkalmazhatósága azért kérdéses, mert pl. Ge esetén megmutattuk, hogy az S-alakú karakterisztika és az áramszál akkor is kialakul, amikor a kontaktus ohmos viselkedése javul (magas hőmérséklet), másrészt az anyag megolvadása esetünkben a pozitív kontaktuson kezdődött el.

Végül a fenti eredményeknek egy olyan vonatkozását említjük, amely lehetőséget ad a felületi áramszálak közvetlen alkalmazására speciális alakú p—n átmenetek kialakításánál.

Az impulzus üzemű termikus letörés okozta megolvadt szálba indiumot vittünk be oly módon, hogy előzőleg a minta felületére kb. 50 μm vastag In réteget párologtattunk fel, és az egyik W-tű hegyét az indium rétegen helyeztük el. A másik tű az n-típusú Ge felületére került, és néhány impulzus után a megolvadt csatornába mikroszkóppal jól látható módon hatolt be az indium. Az így keletkező kb. $30 \div 40\,\mu$m széles $p-n$ átmenetbe $20\,\mu$m vastag a aranyszálat hegesztettünk. A megfelelő marás után jól használható diódákat kaptunk. Egy jellegzetes dióda karakterisztika a 7. ábrán látható. (Az összehasonlítás kedvéért a 8. ábrán egy azonos léptékű karakterisztikát mutatunk be egy Ac 107 típ. tranzisztor bázis-emitter diódájáról.) Ezen eljárás segítségével kis félvezető minták felületére igen nagy számú p—n átmenet készíthető. A fentiekben leírt módszer jelenleg szabadalmi eljárás alatt van.

IRODALOM

1. S. Demeter, G. Pataki: *Műsz. Tud.* **45** 435 (1972)
2. J. J. O'Dwyer: The Theory of Dielectric Breakdown of Solids Oxford, Clarendon Press, 1964.
3. W. Franz: Dielektrische Durchschlag: Handbuch der Physik XVII. Springer-Verlag 1956.
4. B. Ancker-Johnson: Plasma Effects in Solids: Semiconductor and semimetals, edited by R. K. Willardson and A. C. Beer, vol. 1. AP. New York and London (1966).
5. B. K. Ridley: *Proc. Phys. Soc.* London, **82** 954 (1963).
6. K. Henk: *Híradástechnika*, **19** 233 (1968).
7. Yu. R. Nosov: Fizicseszkie osznovü rabotü poluprovodnikova dioda v impulznom rezsime Izd. „Nauka" (1968) Moszkva.
8. Yu. V. Lisyuk: *Izv. Vuzov* N° **2**, 68 (1966).
9. G. Pataki and K. Henk: *Phys. stat. sol.*, **34** K1 (1969).
10. T. Ishii: *J. Phys. Soc. Jap.*, **25** 295 (1968).
11. B. S. V. Gopalam and K. V. Reddy: *Int J. Electronics*, **27** 569 (1969).
12. V. N. Vertoprahov: *Izv. MVO, Fizika* **1** 175 (1958); *A.* I. Morozov: FTT, **2** 620 (1960).

Investigation of the Thermal Breakdown in Ge and Si during Pulse Operation. In the present paper a special case of thermal breakdown is discussed, i.e. that where the energy is injected into a material so quickly that thermal conduction will become negligible. If the thermal energy thus injected attains a critical value, pulse-operation thermal breakdown occurs. The experimental measurements carried out on Ge and Si specimens with saw-tooth voltage resulted in qualitative agreement with theory. With energies above the critical value, molten surface filaments were observed, which can be used in practice too.

Untersuchung des thermischen Durchschlags in Ge und Si bei Impulsbetrieb. Der Aufsatz befasstsich mit einem sonderfall des thermischen Durschlags, und mit jenem, wo in einen Werkstoff die Energie so schnell eingespeist wird, daß die Wärmeleitung vernachlässigbar wird. Wenn die so eingeleitete Energie einen kritischen Wert erreicht, so tritt thermischer Durchschlag im Impulsbetrieb ein. In der kurzen Darlegung dieser Theorie dieses Durchschlags zeigen die Verfasser, daß die kritische Energie unabhängig von der Dauer des angewandten Impulses ist. Die an Ge- und Si-Proben mit Sägezahnspannung durchgeführten Versuchsmessungen ergaben eine qualitative Übereinstimmung mit der Theorie. Bei höheren Energien als der kritischen wurden geschmolzene Oberflächenfasern beobachtet, die auch in der Praxis verwendet werden können.

A STACIONER TERMIKUS LETÖRÉS GERMÁNIUMBAN ÉS SZILÍCIUMBAN

DEMETER SÁNDOR és PATAKI GYÖRGY

MTA MŰSZAKI FIZIKAI KUTATÓ INTÉZET, BUDAPEST

[Beérkezett 1971. július 28-án]

A dolgozatban különböző fajlagos ellenállású Ge és Si mintában vizsgáltuk a stacioner termikus letörés jelenségét. Meghatároztuk a letöréshez szükséges kritikus feszültség, áram és teljesítmény hőmérséklet függését. A kapott kísérleti eredményeket igen jól lehetett értelmezni a töltéshordozók mozgékonyságának és a tiltott sáv hőmérsékletfüggésének figyelembevételével.

Jelölések

σ = fajlagos vezetőképesség,
T = hőmérséklet,
U = feszültség,
q = a minta keresztmetszete,
l = a minta hossza,
β = hőelvezetési együttható,
F = a minta felülete,
T_0 = környezeti hőmérséklet,
I = áram,
T_k = kritikus hőmérséklet a termikus letörési csúcsban,
n = elektronkoncentráció,
p = lyukkoncentráció,
n_i = intrinsic koncentráció,
N_d = donorkoncentráció,
W_g = tiltott sáv szélessége,
μ_n = elektronmozgékonyság,
μ_p = lyukmozgékonyság,
k = Boltzmann állandó,
I_k = áram a termikus letörési csúcsban,
U_k = feszültség a termikus letörési csúcsban,
N_k = teljesítmény a termikus letörési csúcsban,
R_T = terhelő ellenállás,
R_M = minta ellenállása.

Bevezetés

A félvezetők termikus letörésének elmélete a dielektrikumok letörésének elméletén alapszik [1], [2]. Az első vizsgálatokat réteg és tűs diódákra végezték el [3]. A probléma részletes analízise még stacioner esetben is nagyon bonyolult, ezért egyszerűsítő feltevéseket kell tenni: bevezetik a minta effektív hőmérsékletét, a mintán belüli hővezetést így figyelmen kívül lehet hagyni. A minta hővesztesége a Newton-féle lehűlési törvénnyel írható le. A Newton-féle lehűlési törvény használhatóságát R. E. Burgess mutatta meg elméletileg [4].

Az áram-feszültség karakterisztikák alakját döntő módon a fajlagos vezetőképesség hőmérsékletfüggése határozza meg. Az első dolgozatokban a fajlagos vezetőképességre exponenciális hőmérsékletfüggést tételeztek fel:

$$\sigma = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right).$$

Ezzel a σ-val nem lehet magyarázni a stacioner áramfeszültség-karakterisztikák, $dU/dI = 0$ csúcsaihoz tartozó teljesítményeknek a környezeti hőmérséklet függvényében való csökkenését.

Ennek kiküszöbölésére Senderikhin a vezetőképességet:

$$\sigma = \sigma_0 + A \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$$

formában veszi fel [5]. Ezzel már magyarázható volt, miért csökken a diódák sztatikus karakterisztikáinak csúcsteljesítménye a környezeti hőmérséklet növelésével. A stacioner termikus letörés pontos vizsgálatánál figyelembe kell venni a töltéshordozók mozgékonyságának, és a tiltott sáv szélességének hőmérsékletfüggését is. Ez csak az utóbbi időkben történt meg germániumra [6].

Jelen dolgozatban kísérletileg vizsgáljuk a Si és Ge stacioner termikus letörését a környezeti hőmérséklet függvényében. A kapott görbéket két paraméter megválasztásával összehasonlítottuk az elméleti számításokkal, kiindulva a [6] dolgozat tárgyalásából.

A $dU/dI = 0$ csúcsnál mért csúcsáram, csúcsfeszültség és csúcsteljesítmény hőmérsékletfüggése jó egyezést mutat az elméletileg számolt értékekkel.

A stacioner termikus letörés elmélete

A termikus egyensúly egyenlete:

$$U^2 \sigma \frac{q}{l} = \beta F(T - T_0), \tag{1}$$

ahol a bal oldal az időegységenként betáplált hőmennyiséget, a jobb oldal az időegységként elvezetett hőmennyiséget jelenti. Az (1)-ben F, l, q a minta felülete, hossza, ill. keresztmetszete, β a minta és környezete közti hőelvezetési együttható, T a minta, T_0 a környezet hőmérséklete. Míg ez az egyenlőség a sztatikus áramfeszültség-karakterisztika minden pontjára vonatkozik, addig az adott T_0-hoz tartozó áramfeszültség-karakterisztika $dU/dI = 0$ csúcsára vonatkozó feltételi egyenlet (lásd pl. [6] dolgozat):

$$\left(\frac{\sigma}{\frac{d\sigma}{dT}}\right)_{T_k} = T_k - T_0, \tag{2}$$

ahol T_k a minta hőmérséklete a karakterisztika $dU/dI = 0$ pontjában. Az egyenlőségből látható, hogy a karakterisztika-csúcsban a minta hőmérséklete nem függ a minta tömegétől m; fajhőjétől c_v; méreteitől l, q, F, és a β hőelveze-

tési együtthatótól. A karakterisztika-csúcs hőmérsékletét a fajlagos vezetőképességen σ-n keresztül az N_d szennyezési koncentráció, W_g tiltott sávszélesség, valamint a T_0 környezeti hőmérséklet határozzák meg. Könnyen belátható, hogy a stacioner áramfeszültség-karakterisztika $dU/dI = 0$ csúcsa mindig magasabb hőmérsékletű, mint a fajlagos vezetőképesség minimumának hőmérséklete.

A (2) egyenletet grafikusan oldjuk meg. Ábrázoljuk a $\sigma/(d\sigma/dT)$ görbéket, és elmetsszük a $T - T_0$ egyenesekkel. A metszéspontok az illető környezeti hőmérsékletekhez tartozó $dU/dI = 0$ csúcsok T_k hőmérsékletét adják meg.

Az 1. és 2. ábrák a $\sigma/(d\sigma/dT)$ görbék seregét mutatják n-típusú, különböző szennyezettségű germániumra és szilíciumra, kiindulva az ismert $\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$ összefüggésből, ahol n, p, illetve μ_n, μ_p az elektronok és lyukak koncentrációja, ill. mozgékonysága, míg e az elektrontöltés abszolút értéke. A görbék számításánál a következő összefüggéseket használtuk fel [7]:

a. germániumra:

$$n = \frac{N_d}{2}\left[1 + \left(1 + \frac{4n_i^2}{N_d^2}\right)^{1/2}\right],$$

$$p = \frac{2n_i^2}{N_d}\left[1 + \left(1 + \frac{4n_i^2}{N_d^2}\right)^{1/2}\right]^{-1},$$

$$n_i^2 = 2{,}352 \cdot 10^{30} \cdot T^3 \exp\left[\frac{W_g(T)}{kT}\right] [\mathrm{cm}^{-6}],$$

$$W_g(T) = 0{,}782 \quad 3{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot T \quad [\mathrm{eV}],$$

$$\mu_n = 4{,}9 \cdot 10^7 \cdot T^{-1{,}66} \quad [\mathrm{cm^2\,V^{-1}\,sec^{-1}}],$$

$$\mu_p = 1{,}05 \cdot 10^9 \cdot T^{-2{,}33} \quad [\mathrm{cm^2\,V^{-1}\,sec^{-1}}].$$

b. szilíciumra:

Az n elektron és p lyukkoncentráció képlete természetesen ugyanaz, mint germániumnál, míg

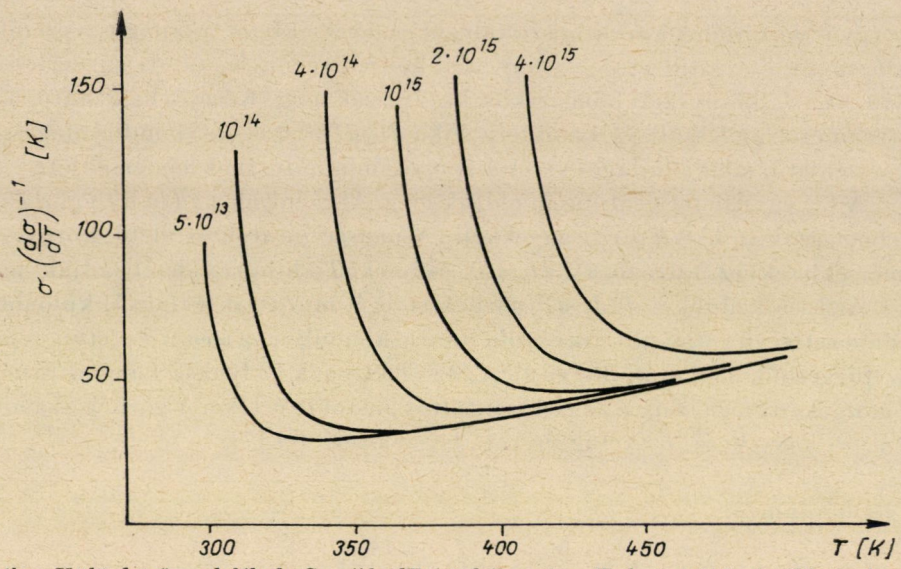
$$n_i^2 = 1{,}06 \cdot 10^{31} \cdot T^3 \exp\left[\frac{W_g(T)}{kT}\right] [\mathrm{cm}^{-6}],$$

$$W_g(T) = 1{,}205 - 2{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot T \ [\mathrm{eV}],$$

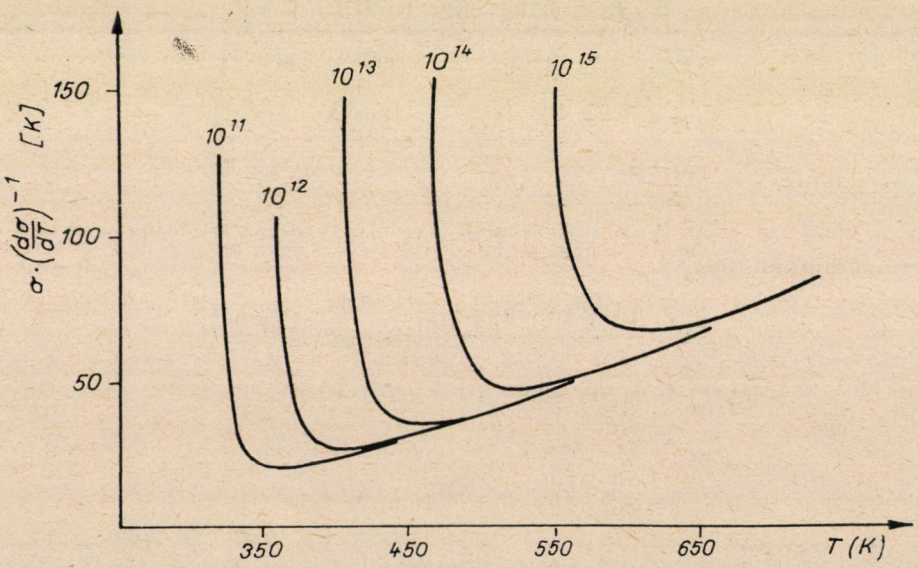
$$\mu_n = 4 \cdot 10^9 \cdot T^{-2{,}6} \ [\mathrm{cm^2\,V^{-1}sec^{-1}}],$$

$$\mu_p = 2{,}5 \cdot 10^8 \cdot T^{-2{,}3} \ [\mathrm{cm^2\,V^{-1}sec^{-1}}].$$

A fenti formulákban a T hőmérsékletet mindenütt Kelvin fokokban kell beírni.



1. ábra. Különbözően adalékolt Ge $\sigma/(d\sigma/dT)$ görbéi a minta T_k letörési hőmérsékletének meghatározásához. A görbék melletti értékek az N_d donor koncentrációt adják cm^{-3} egységekben.



2. ábra. Különbözően adalékolt Si $\sigma/(d\sigma/dT)$ görbéi a T_k letörési hőmérséklet meghatározásához. A görbék melletti értékek az N_d donor koncentrációt adják cm^{-3} egységekben.

A T_k csúcshőmérséklet ismeretében az (1) termikus egyensúly egyenletből az alábbi

$$I_k = \sqrt{\beta F \frac{q}{l} \cdot \sigma_{T_k}(T_k - T_0)}, \tag{3}$$

$$U_k = \sqrt{\beta F \frac{l}{q} \frac{T_k - T_0}{\sigma_{T_k}}}, \tag{4}$$

$$N_k = \beta F(T_k - T_0) \tag{5}$$

összefüggések számolhatók, ahol I_k, U_k, N_k a $dU/dI = 0$ csúcsnál mérhető áram, feszültség és a hozzátartozó teljesítmény.

Kísérleti technika

A méréseket áramgenerátoros üzemmódban végeztük, melynél teljesül az $R_T \gg R_M$ feltétel. Itt R_T az áramot meghatározó ellenállás, R_M a minta ellenállása. A nagy R_T ellenállás a minta pillanatnyi ellenállásváltozásaitól függetlenül konstans áramot kényszerít az áramkörre, és megakadályozza az áram megfutását. Így kimérhető a sztatikus áram-feszültség-karakterisztika negatív ellenállású szakaszának jelentős tartománya.

A környezeti hőmérsékletet ultratermosztáttal állítottuk be ($T = \pm 0{,}5$ °C pontossággal. A mintákat a termosztát légterébe helyeztük, így a hőelvezetés kicsi volt. Az áram-feszültség-karakterisztikák kimérése n-típusú 2 Ω cm, 8 Ω cm, 10 Ω cm és 32 Ω cm-es germánium, illetve n-típusú 1,5 Ω cm és 340 Ω cm-es szilícium mintákon történt.

Mérési eredmények és kiértékelésük

A stacioner termikus letörés elméletének és a kísérleti eredményeknek az egyeztetését mind Ge-ra, mind Si-ra elvégeztük.

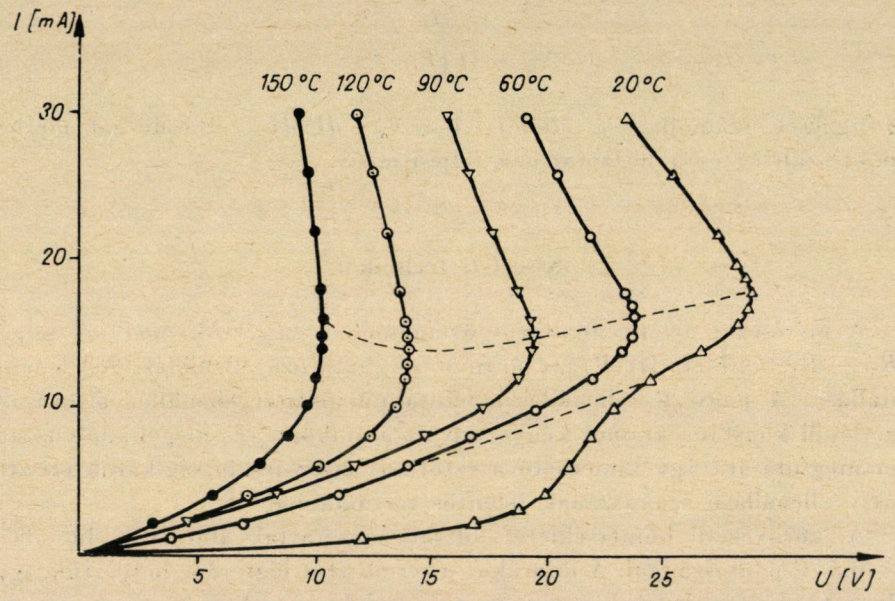
Itt a 340 Ω cm-es szilícium mintára vonatkozó eredményeket ismertetjük.

A minta stacioner áram-feszültség-karakterisztikái a 3. ábrán láthatók. A (3); (4) és (5) képletek segítségével kiszámoltuk az

$$I_k = I_k(T_0), \qquad U_k = U_k(T_0), \qquad N_k = N_k(T_0)$$

függvényeket. A számított görbéket a 4. ábra folytonos vonalai ábrázolják. A körök és háromszögek a kísérletileg mért értékeket jelölik. A számolásnál felhasznált $\beta F q/l$ és $\beta F l/q$ konstansokat (β értékét a vizsgált hőmérséklettarto-

mányban állandónak tekintettük) a $T_0 = 393$ °K környezeti hőmérsékleten kimért sztatikus áram-feszültség-karakterisztika csúcsáramából és csúcsfeszültségéből számoltuk. Ennél a pontnál történt a számított és mért görbék illesztése. Látható, hogy a kísérletileg vizsgált hőmérsékleti tartományban az $I_k(T_0)$, $U_k(T_0)$, $N_k(T_0)$ görbék kielégítően követik a számított görbék menetét. Sajnos, a vizsgált tartományban nem lehetett kimérni az $N_k(T_0)$ minimumát.



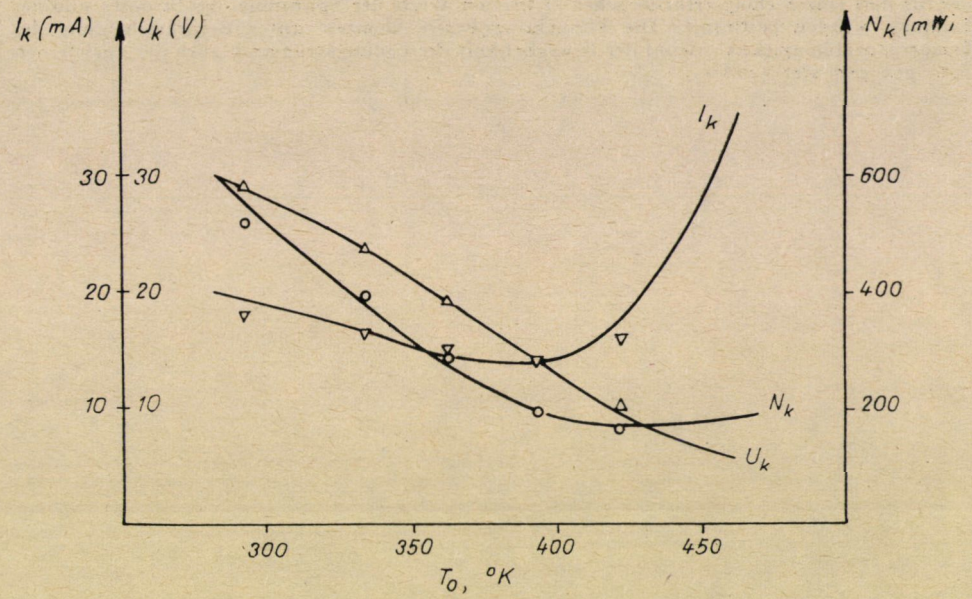
3. ábra. A 340 Ω cm-es szilícium minta sztatikus áram-feszültség-karakterisztikái különböző környezeti hőmérséklet esetén.

Érdemes megjegyezni, hogy az áram-feszültség-karakterisztika stacioner esetben nem mutat teljes S alakot. Az áramot a csúcsáram ötszörösére növelve a karakterisztika nem fordult ismét pozitívba.

A 3. ábrán látható, hogy $T = 293$ °K környezeti hőmérséklethez tartozó áram-feszültség-karakterisztika eltér a szaggatott vonallal behúzott, várt áram-feszültség-karakterisztikától.

Mivel a minta kevéssé szennyezett, nagy Ω cm-es, feltehető, hogy az Sb—Au ötvözött kontaktusok a mintán nem adnak ohmos kontaktusokat. A kontaktusoknál feltételezhető p—n átmenetek közül az egyik nyitó, másik záró irányba van előfeszítve. A feszültség növelésekor, a feszültség nagy része a záró irányba előfeszített p—n átmenetre esik, és csak a maradék része jut a mintára. Elég nagy feszültségeknél ez a záróirányú átmenet letörik, az áram megnő, és a minta összfeszültségét most már a minta saját ellenállása szabja meg. Magasabb környezeti hőmérsékleteknél ez a jelenség eltűnik.

Megfelelő feltételek mellett (alacsony hőmérséklet, feszültséggenerátoros üzemmód) a mozgékonyság hőmérsékletfüggése N alakú I—V karakterisztika kiméréséhez vezethet. Az N karakterisztika $dI/dU = 0$ minimuma a σ minimum előtt jelentkezik. Mivel azonban a $\mu = \mu(T)$ által megadott mozgékonyságváltozás gyenge, az N karakterisztika minimuma kevésbé határozott, mint a stacioner termikus letörés feszültségmaximuma.



4. ábra. A U_k; I_k; és N_k értékek környezeti hőmérsékletfüggése. A folytonos vonal az elméletileg számított értékeket mutatja.

A stacioner termikus letörésnél felhasznált számítások alkalmazhatók arra az esetre is, amikor a koncentrációváltozás mély csapdák kiürülésével kapcsolatos. Újabban GaP termikus letörését vizsgálták hasonló módon a [8] dolgozatban.

IRODALOM

1. S. Whitehead: Dielectric Breakdown of Solids. Oxford (1951).
2. J. J. O'Dwyer: The Theory of Dielectric Breakdown of Solids, Oxford (1964).
3. S. Benzer: *J. Appl. Phys.*, **20** 804 (1949).
4. R. E. Burgess: *Proc. Phys. Soc.*, **68**/B 908 (1955).
5. I. M. Senderikhin: *Fiz. Tverd. Tela*, **2** 1506 (1960).
6. I. M. Senderikhin: *Izv. Vuzov.* USSR Fizika N°., **9** 144 (1967).
7. R. A. Smith: Semiconductors, Cambridge (1961).
8. K. Somogyi: *Acta Physica Hung.*, **29** 383 (1970).

Stationary Thermal Breakdown in Ge and Si. The authors report on examinations of the stationary thermal breakdown in Ge and Si specimens with various specific resistances. They determined the critical values of voltage, current and power required for the breakdown. The experimental results could be interpreted very well, taking into consideration the temperature dependence of charge carrier mobility and of the forbidden gap.

Stationärer thermischer Durchschlag in Ge und Si. Die Verfasser berichten über Untersuchungen betreffend die Erscheinung des stationären thermischen Durchschlags in Ge- und Si-Probekörpern mit verschiedenem spezifischem Widerstand. Die Temperaturabhängigkeit der für den Durchschlag erforderlichen kritischen Werte der Spannung, des Stromes und der Leistung wurden bestimmt. Die Versuchsergebnisse konnten unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit sowohl der Beweglichkeit der Ladungsträger als auch der verbotenen Zone gut gedeutet werden.

A TÉRTÖLTÉSMENTES SÖTÉTKISÜLÉSEK FONTOSABB JELENSÉGEIRŐL

BITÓ JÁNOS*
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK DOKTORA
és
BOLLA ISTVÁN**

[Beérkezett: 1971. dec. 20.]

Áttekintést adunk a tértöltésmentes kisülések első és második Townsend-féle koefficiens felhasználásával megadott jellemzési módszereiről. Megmutatjuk az első Townsend-féle koefficiens kinetikus gázelmélettel való összekapcsolhatóságát, és elemezzük a szekunder emissziós tényezővel jellemzett fontosabb határfelületi jelenségeket. A tértöltésmentes sötétkisülésekre jellemző paraméterek felhasználásával olyan matematikai modellt írunk le, amely jó közelítéssel az összes fontosabb kölcsönhatási folyamatot magában foglalja.

1. Bevezetés

A két vezető síkelektród közötti gáztérben a térerősség hatására a külső ionizációs források által keltett ionizált és gerjesztett részecskék egész sor elemi kölcsönhatási folyamatot hoznak létre. Ezek közül kisülésfizikai szempontból a térbeli ionizációs, rekombinációs, valamint gerjesztési jelenségek és a határfelületeken lejátszódó kölcsönhatási folyamatok játszanak kitüntetett szerepet.

A most következőkben ezen kölcsönhatási folyamatok kisülési áramkarakterisztikára gyakorolt hatását fogjuk elemezni néhány modell bemutatásán keresztül.

2. A Townsend-féle sötétkisülési modell

A tértöltésmentes sötétkisülések leírásával TOWNSEND foglalkozott először [1], aki feltételezte, hogy a kisülésben három alapvető kölcsönhatási mechanizmus játszik szerepet: az elektronok és a pozitív ionok által keltett térbeli ionizációs jelenségek, valamint a pozitív ionok által a katódfelületből kiváltott szekunder elektronemisszió. Ennek megfelelően a kisülési áramkarakterisztika meghatározására felírt egyenletrendszerben TOWNSEND három, a plazmát, illetve a plazma-katód kölcsönhatását jellemző tényezőt vezetett be: α-val jellemzi az egy elektron által egységnyi úthosszon létrehozott új

* Dr. Bitó János. Budapest XII., Korompai u. 22/a.
** Bolla István, Budapest VII., Kertész u. 43.

elektron-ion párok számát; β-val a katód felé haladó pozitív ion által egységnyi úthosszon létrehozott új elektron-ion párok számát; γ-val pedig a katódfelületre becsapódó pozitív ion által kiváltott elektronok számát.

Tértöltésmentes kisüléseket leíró modelljében TOWNSEND feltételezte, hogy az elektronok homogén sebességeloszlással rendelkeznek, vagyis egyazon közepes driftsebességgel haladnak. Feltételezte továbbá, hogy a katódból történő szekunder elektron kiváltás kizárólag a pozitív ionok becsapódása útján történik.

A fentiek figyelembevételével a gáztérben keletkező elektronokra és pozitív ionokra a következő mérlegegyenlet írható fel:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} &= -\frac{\partial n_e}{\partial x} v_e + \alpha n_e v_e + \beta n_i v_i, \\ \frac{\partial n_i}{\partial t} &= \frac{\partial n_i}{\partial x} v_i + \alpha n_e v_e + \beta n_i v_i, \end{aligned} \tag{1}$$

ahol n_e — az elektronsűrűség,
v_e — az elektronok közepes driftsebessége.
α — az első Townsend koefficiens, az elektron által egységnyi úthosszon keltett új elektron-ion párok száma,
β — a pozitív ionok által egységnyi úthosszon keltett új elektron-ion párok száma,
v_i — a pozitív ionok közepes driftsebessége,
n_i — a pozitív ionok sűrűsége.

Az (1) egyenletrendszer megoldása az alábbi peremfeltételek mellett történhetik:

$$i_e(0) = i_0 + \gamma i_i(0); \qquad i_e(d) = i, \tag{2}$$

azaz a katódfelületen az elektronáram a kívülről beérkező fény által kiváltott kezdeti fotoáramból, valamint a pozitív ionok által keltett szekunder elektronáramból áll. TOWNSEND azt is feltételezte, hogy a kisülési térben az elektronokon kívül nem keletkeznek másfajta negatív töltéshordozók, tehát:

$$i = n_e v_e e + n_i v_i e. \tag{3}$$

Időben nemstacioner kisülési folyamatok esetén az (1) kapcsolt egyenletrendszer megoldása az időtől ugyancsak függő (2) peremfeltételek mellett meglehetősen nehézkes. Így TOWNSEND egy egyszerűbb, stacioner feladatot vizsgált, azt feltételezve, hogy az n_e elektron, illetve az n_i ionkoncentrációk

időtől függetlenek. Ebben az esetben az (1) egyenletrendszer az alábbi alakot veszi fel:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e v_e}{\partial x} + \alpha n_e v_e + \beta n_i v_i &= 0, \\ \frac{\partial n_i v_i}{\partial x} + \alpha n_e v_e + \beta n_i v_i &= 0. \end{aligned} \tag{4}$$

A (4) egyenletrendszer, valamint a (3) összefüggés figyelembevételével az alábbi egyenletet kapjuk:

$$\frac{\partial (n_e v_e)}{\partial x} + (\alpha - \beta) n_e v_e + \beta \frac{i}{e} = 0. \tag{5}$$

Az (5) egyenlet általános megoldása az $i_e = e n_e v_e$ összefüggés behelyettesítése után:

$$i_e = C \cdot e \exp(\alpha - \beta) x - \frac{\beta}{\alpha - \beta} i. \tag{6}$$

A (2) peremfeltételek segítségével meghatározható a C konstans értéke. Az így nyert megoldás:

$$i = i_0 \frac{(\alpha - \beta) \exp(\alpha - \beta) d}{(1+\gamma)\alpha - (\alpha\gamma + \beta) \exp(\alpha - \beta) d}. \tag{7}$$

A fenti (7) összefüggés alapján tehát meghatározható az időben stacioner kisülési áram értéke az elektródtávolság d, valamint a Townsend-féle tértöltésmentes kisülési folyamatot jellemző három alapvető paraméter α, β és γ függvényében.

Meg kell jegyeznünk, hogy a TOWNSEND által bevezetett, s a pozitív ionok által keltett térbeli ionizációs folyamatokat jellemző β tényező — a korábbi elképzelésekkel ellentétben — a gyakorlatban előforduló gázkisülési kondíciók mellett elhanyagolható szerepet játszik az α, illetve a γ tényező által jellemzett, az elektronok által kiváltott térbeli ionizációs jelenséghez és a felületi kölcsönhatási folyamatokhoz viszonyítva.

A továbbiakban tehát a β tényezőt nullának tekinthetjük, s így a (7) megoldás az alábbiak szerint módosul:

$$i = \frac{i_0 \exp(\alpha d)}{1 - \gamma [\exp(\alpha d) - 1]}. \tag{8}$$

A (8) összefüggésből látható, hogy — mint már korábban rámutattunk — a γ tényező fontos szerepet játszik a sötétkisülési áram kialakulásában. Bár

TOWNSEND kiindulási modelljében a γ tényezővel csak a pozitív ionok által kiváltott szekunder emissziót jellemezte, jelenleg a γ sokkal átfogóbb jelentőséggel bír. Az utóbbi évek vizsgálatai [2] ugyanis rámutattak arra, hogy a pozitív ionok által kiváltott szekunder folyamatok mellett fontos szerepük van a kisülésben keletkező rezonancia és nemrezonancia fotonoknak, valamint a metastabil atomoknak is.

Ha a γ tényező $\to 0$ akkor a (8) kifejezés leegyszerűsödik, s a kisülési áram exponenciálisan növekszik a távolság függvényében:

$$i = i_0 \exp\ (\alpha d). \tag{9}$$

A kifejezés exponensében szereplő α elektronsokszorozási tényező függ az E térerősségtől, valamint a gáz minőségétől és p nyomásától.

Az eredeti Townsend-féle modellben az α az elektronok által egységnyi úthosszon létrehozott elektronok számát jelöli. Szükségesnek látjuk rámutatni arra, hogy a gáztérben jelenlevő elektronok különböző térirányú sebességkomponensekkel rendelkeznek, s ezért az α tényező csak egy közepes értéknek tekinthető, s annak elméleti meghatározása az elektronok konkrét sebességeloszlási függvényének segítségével lehetséges.

Az alábbiakban röviden megmutatjuk, hogy milyen módon függ az α tényező a gázok mikroparamétereitől.

3. Az α tényező meghatározása a kinetikus gázelmélet alapján

Az α tényező térerősségtől, valamint nyomástól való függését egy igen egyszerű modell segítségével fogjuk megvizsgálni [3].

Jelöljük a λ_e-vel a gázban az elektronok közepes szabad úthosszát. Ekkor az egységnyi úthosszra eső ütközések száma $\nu_e = 1/\lambda_e$. Az egyszerűség kedvéért feltételezzük továbbá, hogy ezen ütközések közül csak azok eredményeznek ionizációt, amelyeknél az ütközésben résztvevő elektronok az első ionizációs energiánál nagyobb energiával rendelkeznek. Az ütközést megelőzően az elektronnak tehát az alábbi feltételt kielégítő távolságot kell befutnia:

$$E\lambda_i \geq U_i,$$

ahol E a térerősség értéke.

A gázok kinetikus elméletének megfelelően az egységnyi szabad úthosszon létrejövő ütközések során $\nu_e \exp(-\lambda_i/\lambda_e)$ elektron fut be λ_i-nél nagyobb távolságot, azaz tesz szert $U_i \leq U_e$ energiára.

Az ionizációs hatáskeresztmetszetet lépcsős függvénnyel approximálva, azaz:

$$S_i = 0, \quad \text{ha} \quad U_e < U_i, \qquad S_i = 1, \quad \text{ha} \quad U_e \geq U_i,$$

továbbá feltételezve, hogy a rugalmatlan ütközés következtében az elektron egész kinetikus energiáját elveszti, s hogy az elektronok λ_e szabad úthossza sokkal kisebb, mint a kisülési térköz d mérete, akkor:

$$\alpha = \nu_e \exp\ (-\lambda_i/\lambda_e),$$

illetve a $\lambda_i = U_i/E$ összefüggést felhasználva:

$$\alpha = \nu_e \exp\ (-U_i \nu_e/E). \tag{10}$$

Amennyiben az egységnyi szabad úthosszon, egységnyi nyomáson létrejövő ütközések számát $\nu_0 = 1/\lambda_0$-val jelöljük, akkor:

$$\alpha = p\nu_0 \exp\ (-\nu_0 U_i p/E),$$

és így

$$\frac{\alpha}{p} = \nu_0 \exp\left(-\nu_0 U_i \frac{1}{E/p}\right). \tag{11}$$

A fentiekben megvizsgált egyszerű modell segítségével kapott összefüggésből látható, hogy az α nem az E és p mennyiségektől külön-külön, hanem azok hányadosától függő paraméter. A fenti megállapítást egyébként a jelenleg rendelkezésre álló nagyszámú, a legkülönbözőbb gázokban kapott kísérleti eredmények fényesen alátámasztják [4–6].

Az α ionizációs tényező E és p paraméterektől való függésének meghatározása szigorú matematikai formában az ionizációs hatáskeresztmetszet energiafüggésének és az elektronok sebességeloszlási függvényének figyelembevételével végezhető el.

Az összefüggések részletes ismertetésére (7) nem térünk ki, csupán megjegyezzük, hogy amennyiben feltételezzük a Maxwell-féle sebességeloszlást:

$$F_e(v) = 4\pi \left(\frac{m_e}{2\pi k T_e}\right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{m_e v^2}{2kT_e}\right) v^2,$$

a rugalmatlan ütközésekre pedig lineáris hatáskeresztmetszet approximáció [8] veszünk figyelembe:

$$S_i = C_1(U_e - U_i),$$

ahol m_e — az elektron tömege,
k — a Boltzman-féle állandó,
T_e — az elektronhőmérséklet,
v — az elektronok sebessége,
C_1 — arányossági tényező,
U_e — ütközés előtti elektronenergia,
U_i — az ionizációs energia

akkor az α/p-re a következő összefüggést kapjuk:

$$\frac{\alpha}{p} = A_1 T_g (8/\pi\varkappa)^{1/4} \exp\left[-(8\varkappa/\pi)^{1/2} \frac{U_i p}{\lambda_0 E} \right] \left[U_i + (\pi/8\varkappa)^{1/2} \cdot \frac{\lambda_0 E}{p} \right] \quad (12)$$

ahol A_1 — állandó,
$\varkappa$ — az egy ionizációs ütközésre jutó energiaveszteség,
λ_0 — az elektron egységnyi nyomásra vonatkoztatott szabad úthossza,
T_g — a gázhőmérséklet.

A finomított modell segítségével meghatározott (12) összefüggésből ugyancsak látható, hogy az α/p hányados egy $f/E(p)$ függvénykapcsolattal jellemezhető. Az elektronok sebességeloszlási függvényének és az ionizációs hatáskeresztmetszet pontosabb megoldásával természetesen még tovább tökéletesíthető az α/p elméleti úton történő meghatározása.

Megjegyezzük, hogy a (12) összefüggés alapján meghatározott α/p értékek egyes gázok (H_2, N_2) esetében a $20 \div 200$ V/cm · torr tartományban a kísérleti eredményekkel jól megegyeznek [9]. A legtöbb nemesgáznál azonban az elméleti úton meghatározott értékek nagyságrendileg különböznek a kísérleti értékektől [10], s ez feltehetően az elektronok λ_0 szabad úthosszának sebességtől, illetve energiától való függésének tudható be.

Mint arra már korábban rámutattunk, a Townsend-féle kisülésekben a térbeli ionizációs folyamatokon kívül fontos szerepet játszanak a γ tényező által jellemzett szekunder jelenségek is. A Townsend-féle kiindulási modellben a γ tényező a pozitív ionok által kiváltott szekunder emissziós folyamatokat jellemzi, a legtöbb kisülési kondíció esetében azonban még a fotonok, illetve a metastabil atomok és a katódfelület közötti kölcsönhatási jelenségek is fontos szerepet játszhatnak [11]. Ezért a továbbiakban a γ tényezőt egy olyan komplex paraméternek fogjuk tekinteni, amely magába foglalja ezen három főbb kölcsönhatási folyamatot.

4. A γ tényező által jellemzett folyamatok áttekintése

Mint arra utaltunk, a kisülési folyamatok során jelentkező plazma-katód kölcsönhatás lényegében három alapvető folyamatra vezethető vissza: a pozitív ionok által, a kisülési térben keletkező fotonok által, valamint a metastabil atomok, illetve molekulák által keltett szekunder folyamatokra.

Az alábbiakban ezen három kölcsönhatási folyamatot fogjuk áttekinteni.

Mint ismeretes az elektronlavina által keltett pozitív ionok az elektromos tér hatására egy v közepes driftsebességgel mozognak a katód felé. A katódfelület elérésekor a pozitív ionok potenciális és kinetikus elektronkiváltási mechanizmus útján szekunder elektronokat emittálhatnak a katódfelületből.

A kinetikus elektronkiváltás során az elektromos térben egy vagy több szabad úthossz alatt felgyorsult pozitív ionok a felületre való becsapódáskor szekunder elektronokat „löknek" ki a fémfelületből. Számos kísérleti eredmény azonban azt bizonyítja, hogy a kinetikus jellegű szekunder elektronkiváltás az esetek többségében csak 300÷400 eV-ot meghaladó kinetikus energiáknál válik jelentőssé. Így például a fémtiszta Mo felület A^+ ionokkal történő bombázásakor a küszöbenergia értéke 600 eV körül van [12]. A normális gázkisülési kondíciók mellett a katódfelületbe becsapódó pozitív ionok kinetikus energiája $E_{kin} \sim 10$ eV, így a potenciális jellegű szekunder elektronkiváltást kell valószínűbbnek tekintenünk.

A potenciális szekunder elektronkiváltás legvalószínűbb mechanizmusának a pozitív ionok felületi Auger-féle rekombinációját, és az ezt követő szekunder-elektron kiváltást [13], valamint a pozitív ionok felületi rezonancia neutralizációját és az ezzel egyidejűleg jelentkező szekunder elektron kiváltást[14] tekinthetjük.

A pozitív ionok rezonancia neutralizációja során az ionizált atom és az elektródfelület kölcsönhatásakor először egy rezonanciaszintre gerjesztett atom keletkezik. A kölcsönhatási folyamat sematikusan a következőképpen jelölhető:

$$A^+ + Ne_f^- \rightarrow A^* + (N-1)\,e_f^-, \tag{13}$$

ahol A^* — a gerjesztett állapotban levő semleges gázatom.
A^+ — a felülettel kölcsönhatásba lépő ion.
e_f^- — a fém vezetési elektronja,
N a fém vezetési sávjában tartózkodó elektronok száma.

A folyamat létrejöttének feltétele:

$$e\bar{\varphi} < E_m < W_a,$$

ahol $e\bar{\varphi}$ — a fémfelület közepes kilépési munkája.
E_m az elektron Fermi-szinthez viszonyított energiája,
W_a a külső kilépési munka.

A (13) folyamat során a keletkező gerjesztett atom Auger-féle rekombináció következtében energetikai alapállapotba mehet át, egy szekunder elektron egyidejű kiváltásával, azaz

$$A^* + Ne_f^- \rightarrow A + e^- + (N-1)\,e_f^-, \tag{14}$$

ahol e^- — a kiváltott szekunder elektron,
A az energia alapállapotban lévő atom.

A szekunder elektron kiváltásának feltétele az, hogy a gerjesztett atom E_g gerjesztési energiájának értéke meghaladja a fémfelület közepes kilépési munkáját, azaz: $e\bar{\varphi} < E_g$.

SEHTER és HAGSTRUM [14] szerint az $E_{kin} < 10$ eV energiával rendelkező inert gázok esetében az egyfokozatú Auger-féle rekombináció játszik alapvető szerepet, amely sematikusan a következőképpen írható le:

$$A^+ + Ne_f^- \rightarrow A + e^- + (N \quad 2)\, e_f^- . \tag{15}$$

Ez a szekunder elektron kiváltási folyamat abban az esetben jöhet létre, ha a kölcsönhatásban résztvevő gázatom ionizációs energiája nagyobb, mint a fémfelület közepes kilépési munkája, tehát

$$E_i > \overline{e\varphi}.$$

Az ismertetett szekunder-elektron kiváltási folyamatokat elméleti úton részletesebben PROBST [15] és HAGSTRUM [14] vizsgálták. A PROBST által alkalmazott elméleti közelítésben a fém vezetési sávjában elhelyezkedő elektron és a felületbe becsapódó ion közötti neutralizáció során létrejövő mikrotér perturbáció váltja ki a szekunder elektront a fém vezetési sávjából. A HAGSTRUM által alkalmazott közelítésben pedig a kölcsönhatásban résztvevő két elektron közötti Coulomb-féle potenciál játszik szerepet.

A gázkisülési folyamatok során az ionizált részecskéken kívül az elektronok és atomok közötti rugalmatlan ütközések eredményeképpen — mint ismeretes — rezonancia, valamint metastabil energiaszintre gerjesztett atomok is keletkeznek. Ezen részecskék kétféleképpen fejthetik ki hatásukat: egyrészt különböző rugalmatlan ütközéses folyamatok során a térben fotonkibocsátás mellett rekombinálódnak, s az ilymódon keletkező fotonok hozzák létre a szekunder jelenségeket, másrészt pedig a gerjesztett részecskék a katódfelülettel való kölcsönhatás során — egyidejű elektronkiváltás mellett — rekombinálódnak.

A gáztér-katód kölcsönhatás szempontjából a pozitív ionok mellett a fotonok által kiváltott szekunder emisszió, valamint a metastabil atomok felületi rekombinációja lényeges. Meg kell jegyeznünk azonban, hogy a Townsend-féle sötétkisülésekben a kisülési térben keletkező fotonok által létrehozott szekunder jelenségek áramkarakterisztikára gyakorolt hatása nem jelentős, így ezen jelenségcsoporttal nem foglalkozunk.

A katódfelülettel kölcsönhatásba lépő metastabil atomok kétféle mechanizmus útján válthatnak ki szekunder elektronokat a fémfelületből: egyrészt elsőrendű ütközések során, amikor is a felületbe becsapódó metastabil részecske az ütközés következtében rezonancia szintre gerjesztődik, majd egy τ relaxációs idő elteltével fotonkibocsátás mellett rekombinálódik [16], s az így kibocsátott foton szekunder elektront válthat ki a fém vezetési sávjából; másrészt a metastabil atomok a felületi kölcsönhatás során először ionizálódnak, majd ezt követően a korábban már ismertetett Auger-féle mechanizmus szerint neutralizálódnak [17].

A fentiekben felsorolt, szekunder elektronkiváltást eredményező jelenségek mechanizmusának elméleti vizsgálata kvantummechanikai feladat, amelyre a továbbiakban nem kívánunk részletesebben kitérni. Kisülésfizikai szempontból lényegesebbnek látjuk az említett kölcsönhatási folyamatok kisülési áramkarakterisztikára gyakorolt hatásának vizsgálatát.

Mielőtt rátérnénk a tértöltésmentes kisülésekben lejátszódó térfogati és felületi jelenségeket széleskörben figyelembe vevő elméleti modell [18] ismertetésére, áttekintést adunk az e kisülésekben alapvető szerepet játszó szekunder folyamatokról.

A Townsend-féle tértöltésmentes kisülésekben létrejövő másodlagos folyamatokat két alapvető csoportra oszthatjuk fel: a gáztérben lejátszódó térfogati jelenségekre, valamint a határfelületeken lejátszódó úgynevezett felületi jelenségekre.

Térfogati szekunder jelenségek

a) az elsődleges elektronlavina által keltett rezonancia fotonok okozta fotoionizációs jelenségek;

b) a másodrendű ütközések következtében létrejövő gerjesztési, ionizációs, valamint rekombinációs folyamatok.

Felületi kölcsönhatási jelenségek

a) a katód felületére becsapódó pozitív ionok által potenciális és kinetikus úton kiváltott szekunder elektronemisszió, valamint a felületi ionizációs és rekombinációs jelenségek;

b) a kisülési térben keletkező fotonok által kiváltott fotoemisszió;

c) az atomi és molekuláris metastabil állapotok katódfelületi jelenségei.

Megjegyezzük, hogy a fentiekben felsorolt szekunder folyamatokon kívül erősen inhomogén elektromos terek esetén még fontos szerepet játszhatnak a térfogati fotoionizációs jelenségek is, az olyan gázkeverékekben pedig, ahol az egyik gázösszetevő atomjainál a metastabil energiaszintnek gerjesztési energiája csak kismértékben haladja meg a másik gázösszetevő atomjainak ionizációs energiáját, lényeges szerepet játszhat a metastabil atom és a semleges gázatom másodrendű ütközésekor letrejövő ionizáció (Penning-féle effektus).

5. A Phelps-féle sötétkisülési modell

A tértöltésmentes sötétkisülések elméleti áttekintéséhez szükségesnek látjuk egy olyan egyenletrendszer bemutatását is, amely figyelembe veszi a rezonancia fotonok, a másodrendű ütközések következtében keletkező nem-

rezonancia fotonok, a molekuláris és atomi ionok, valamint a molekuláris és atomi metastabil atomok Townsend-féle kisülésekben játszott szerepét [18]. A felállított modellben PHELPS — TOWNSENDhez hasonlóan — feltételezi, hogy a töltött részecskék egy, a térerősség által meghatározott közepes driftsebességgel mozognak a végtelen párhuzamos elektródok közötti gáztérben. W. BARTHOLOMECYZYK vizsgálatai alapján [19] feltételezi továbbá, hogy az áram felépülése egy meghatározott λ időállandóval, exponenciális törvény szerint történik.

A tértöltésmentes kisülések Phelps-féle modelljét leíró egyenletek az alábbiak szerint adhatók meg:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = (\alpha_1+\alpha_2)\, n_e\, v_e - v_e \frac{\partial n_e}{\partial x}, \tag{16}$$

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = \alpha_1\, n_e\, v_e + v_1 \frac{\partial n_1}{\partial x} - C_{12}\, n_1, \tag{17}$$

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} = \alpha_2\, n_e\, v_e + v_2 \frac{\partial n_2}{\partial x} - C_{12}\, n_1, \tag{18}$$

$$\frac{\partial n_a}{\partial t} = \alpha_a\, n_e\, v_e + \frac{D_a}{N} \frac{\partial^2 n_a}{\partial x^2} - B_a\, n_a - C_{am}\, n_a, \tag{19}$$

$$\frac{\partial n_m}{\partial t} = C_{am}\, n_a - B_m\, n_m - A_m\, n_{mi} + \frac{D_m}{N} \frac{\partial^2 n_m}{\partial x^2}, \tag{20}$$

$$\frac{\partial n_r}{\partial t} = \alpha_r\, n_e\, v_e - G n_r - A_r\, n_r + A_r \int_0^d n_r(x', t)\, K(|x-x'|)\, dx'. \tag{21}$$

Az egyenletrendszer lezárása az alábbi peremfeltételekkel történik:

a) a katód felületén elektronok csak szekunder mechanizmusok útján keletkeznek, azaz

$$I_e(0, t) = n_e(0, t) v_e = \gamma_1 I_1 + \gamma_2 I_2 + \gamma_a I_a + \gamma_m I_m + \gamma_p I_{ap} + \gamma_p I_{mp} + \gamma_p I_r. \tag{22}$$

b) a kisülési térben az elektronokon kívül nem keletkeznek negatív töltéshordozók, az atomi és molekuláris pozitív ionok által képviselt részecskeáram pedig az anódfelületen nulla:

$$I_1(d, t) = 0; \qquad I_2(d, t) = 0. \tag{23}$$

c) a metastabil atomok és molekulák sűrűsége az elektródfelületeken nulla, azaz feltételezzük, hogy az összes metastabil energiaszintre gerjesztett

részecske rekombinálódik az elektródfelületekkel való kölcsönhatások során:

$$n_m(0, t) = 0, \qquad n_m(d, t) = 0,$$
$$n_a(0, t) = 0, \qquad n_a(d, t) = 0. \tag{24}$$

d) a rezonancia fotonok sűrűsége a kisülési térközön kívül nulla:

$$n_r(x, t) = 0, \qquad \text{ha } x < 0, \quad x > d. \tag{25}$$

Az I_y áramértékek a következő alakban fejezhetők ki:

Az elektronok, atomos ionok, valamint a molekuláris ionok által keltett áramok:

$$I_e = n_e v_e, \qquad I_1 = n_1 v_1, \qquad I_2 = n_2 v_2. \tag{26}$$

A metastabil atomok, illetve molekulák árama:

$$I_{a,m} = \frac{D_{a,m}}{N} \cdot \frac{\partial n_{a,m}(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0}. \tag{27}$$

Az atomi, illetve molekuláris metastabil állapotokból másodrendű ütközések során keletkező nemrezonancia fotonok részecskeárama:

$$I_{ap} = \frac{B_a}{2} \int_0^d n_a(x)\, dx, \qquad I_{mp} = \frac{A_m}{2} \int_0^d n_m(x)\, dx. \tag{28}$$

A rezonancia fotonok áramát pedig a következő összefüggés segítségével határozhatjuk meg:

$$I_r = A_r \int_0^d n_r(x, t)\, dx \int_x^\infty K(y)\, dy. \tag{29}$$

Az egyenletrendszerben a következő jelöléseket alkalmaztuk:

e, 1, 2, a,
m, p, r — az elektronokat, atomi ionokat, molekuláris ionokat, metastabil atomokat, metastabil molekulákat, nemrezonancia fotonokat, valamint a rezonancia fotonokat, illetve atomokat jelző index,
A_m A_r, A_{rm} — a sugárzás átmeneti valószínűsége a rezonancia átmenetek, a nemrezonancia átmenetek, valamint a molekuláris metastabil állapotok számára.
B_y — az ütközési frekvencia két y típusú részecske esetében,
C_{yz} — a háromtest ütközések frekvenciája az y típusú részecske z típusú részecskévé történő átalakulásakor,
d — a katód-anód közötti távolság,
D_y — az y részecske egységnyi nyomásra vonatkoztatott diffúziós állandója,
$K(|x'-x|)$ — a rezonancia sugárzás transzmissziós függvénye az elektronok, ionok, gerjesztett atomok, valamint fotonok sűrűsége,
n_0 — az elektronsűrűség a katód felületén,
N — az alapgáz sűrűsége,
t — idő,

x — az elektródok síkjára merőleges koordináta,
α_y — az egységnyi úthosszon létrehozott új y típusú részecskék száma, v_y — a részecske driftsebessége,
γ_z — a z típusú részecske által a katód felületéből kiváltott szekunder elektronok közepes száma,
I_{yz} — a z típusú részecskék sűrűsége a katódfelületen (az első index a becsapódás előtti állapotot, a második pedig a becsapódás utáni állapotot jelzi),
λ — az áram időbeli felfutását jellemző tényező,
λ_0 — a rezonancia sugárzás hullámhossza,
ν_y — az y részecske egységnyi nyomásra vonatkoztatott gerjesztési frekvenciája.

Mint látjuk, az ismertetett egyenletrendszer 6 egymással kapcsolt egyenletből áll, s így a megoldás csak közelítő módszerek segítségével adható meg.

PHELPS például feltételezi [19], hogy a részecskesűrűség úgy a töltött részecskék, mint a metastabil atomok és molekulák, valamint a rezonancia és nemrezonancia fotonok esetében exponenciálisan növekszik az idő függvényében, s ez a növekedés minden esetben ugyanazon λ növekedési tényezővel jellemezhető. A kezdeti elektronok által létrehozott ionizációs és gerjesztési lavina folyamatok időszerinti változása tehát azonos jellegű.

Ha tehát

$$n_y(x, t) = n_y(x)\, e^{\lambda t}, \tag{30}$$

akkor a (16)—(20) egyenletek egymásba történő behelyettesítéssel megoldhatók. A (21) rezonancia atomok sűrűségének időbeli és térbeli változását leíró egyenlet megoldása pedig a Biberman-féle módszer segítségével, numerikus úton [20] történhetik.

A szükséges paraméterek ismeretében a fenti egyenletrendszer segítségével tehát meghatározható a növekedési tényező és a kisülési rendszer áramkarakterisztikái közötti összefüggés, illetve tisztázható az egyes részfolyamatok tértöltésmentes kisülésben játszott szerepe. A PHELPS által adott megoldás menetére itt nem kívánunk részletesebben kitérni, megjegyezzük csupán, hogy a megoldásokban szereplő, az ionizációs és gerjesztési valószínűségeket, valamint a gerjesztett atomok és az alap-energia állapotban levő atomok közötti kölcsönhatásokat meghatározó paraméterek a kisülésfizikai szempontból fontos argon és neon esetében nem ismertek maradéktalanul, s így a PHELPS által héliumra megadott megoldások nem terjeszthetők ki ezen gázokra.

6. Összefoglaló értékelés

Az előzőekben foglaltakat összegezve megállapíthatjuk, hogy a Townsend-féle sötétkisülési modell a másodlagos folyamatok közül csak a pozitív ionok katódfelületi jelenségeit veszi figyelembe, s eltekint az egyéb fontos szekunder folyamatoktól. Így ez a modell csak közelítő módon alkalmazható a tértöltésmentes folyamatok leírására.

A Phelps-féle modell figyelembe veszi ugyan a kisülésben lejátszódó alapvető kölcsönhatási folyamatokat, de a közelítő megoldásként kapott összefüggések bonyolultsága rendkívül megnehezíti az egyes részfolyamatok kisülési áramkarakterisztikára gyakorolt hatásának elemzését. Ezenkívül a (16)—(21) egyenletrendszer olyan paramétereket tartalmaz, amelyek a kisülésfizika szempontjából fontos nemesgázok esetében (Ne, A) nem ismertek.

A most bemutatott modellek értékelése alapján egy további, könyebben kezelhető leírási módot dolgoztunk ki (21), amelynek ismertetésére annak kísérleti ellenőrzése után kerül sor.

IRODALOM

1. Kapcow, N. A.: Der elektrische Strom in Gasen. Berlin 1954.
2. Newton, R. R.: *Phys. Rev.*, **73** (1948), 570.
3. Granovszkij, V. L.: *Elektricseszkij tok v gaze*, Moszkva 1952.
4. Hale, D. H.: *Phys. Rev.*, **54** (1938). 241.
5. Kruithof, A. A.—Penning, F. M.: *Physica*. **3** (1936). 515.
6. Posin, D. Q.: *Phys. Rev.*, **53** (1938), 293.
7. Antal, K. G.: Doktori értekezés, Budapest 1971.
8. Smith, P. T.: *Phys. Rev.*, **36** (1930), 1293.
9. Emeleus, K. G.—Lunt, R. W.—Meek, C. A.: *Proc. Roy. Soc.*, **A156** (1936). 394.
10. Deas, H. D.,—Emeleus, K. G.: *Phil. Mag.*, **40** (1949), 460.
11. Huxford, W. S.: *Phys. Rev.*, **55** (1939), 754.
12. Meveal, D. B.—Mahadevan, P.: *Phys. Rev.*, **129** (1963), 2086.
13. Cobas, A.—Lomb, W. E.: *Phys. Rev.*, **65** (1944), 327.
14. Hagstrum, H. D.: *Phys. Rev.*, **96** (1954). 936.
15. Probst, F. M.: *Phys. Rev.*, **129** (1963) 7.
16. Kaminski, M.: Atomic and ionic impact phenomena on metal surfaces. New York 1965.
17. Hagstrum, H. D.: *Phys. Rev.*, **104** (1957), 672.
18. Phelps, A. V.: *Phys. Rev.*, **117** (1960), 1.
19. Bartholomecyzyk, V.: *Zeitschrift f. Physik*, **116** (1940). 235.
20. Phelps. A. V.: *Phys. Rev.*, **110** (1958), 1362.
21. Bolla I.: Doktori értekezés. Budapest (1971).

On the More Important Phenomena in Dark Discharges without Space Charges. The authors review the method for characterizing the space-charge-less discharges by using the first and second Townsend coefficients. It is shown that the first Townsend coefficient can be related to the kinetic gas theory, and the more important boundary surface phenomena characterized by the secondary emission factor are analyzed. By making use of the parameters characterizing the space-charge-less dark discharges a mathematical model is described which includes with good approximation all the more important interaction phenomena.

Über die wichtigeren Erscheinungen in den Raumladungsfreien Dunkelentladungen. Die Verfasser geben einen Überblick über die Methoden für die Charakterisierung der raumladungsfreien Entladungen mit dem ersten und zweiten Townsend-Koeffizienten. Es wird gezeigt. daß der erste Townsend-Koeffizient mit der kinetischen Gastheorie in Zusammenhang gebracht werden kann und die durch den Sekundäremissionskoeffizienten charakterisierten wichtigeren Grenzflächenphänomene werden analysiert. Unter Verwendung der die Dunkelentladungen charakterisierenden Parameter wird ein mathematisches Modell beschrieben, das mit guter Näherung sämtliche wichtigeren Wechselbeziehungsvorgänge umfasst.

GUMIBALLONOK STABILITÁSA

DULÁCSKA ENDRE*

[Beérkezett: 1971. szept. 20-án]

A dolgozat a stabilitásvesztésnek egy olyan különleges esetével foglalkozik, amelynél az tiszta húzás mellett következik be. Ez a nagy nyúlóképességű gumiból készült, felfújható ballonok esete. A jelenség oka az, hogy a nagy alakváltozás miatt a keresztmetszetek csökkenése már erősen befolyásolja az anyag nyúlását. A jelenséget példaképpen a dolgozat a gömbalakú ballonon mutatja be.

1. Bevezetés

A stabilitásvesztés jelensége általában nyomott szerkezeteknél szokott előfordulni. Jelen dolgozatunkban egy olyan különleges esetet vizsgálunk, amelynél a stabilitásvesztés tiszta húzás állapotában következik be.

Ez a különleges eset a belső túlnyomással felfújt gumiballonok pl. meteorológiai ballonok esete. A gumi ugyanis olyan nagy alakváltozó képességgel rendelkezik, hogy erre a klasszikus rugalmasságtan kis alakváltozást feltételező összefüggései már nem érvényesek. Emiatt az erő-alakváltozás diagram a nagyobb nyúlásoknál már görbe alakú. Ez a körülmény a belső túlnyomással terhelt ballonok alakváltozását a következő módon befolyásolja. Kezdetben a ballon alakváltozása növekvő nyomásérték mellett növekszik, a nyomásérték azonban egy bizonyos kritikus értéknél nem tud magasabbra emelkedni. E kritikus érték elérése után a ballon fokozott tágulása mellett a ballon csak csökkenő nyomás mellett van egyensúlyban. Ha a nyomást állandó értéken tartjuk, a ballon korlátlanul tágul, amíg a ballon nyúlása a szakadási határt el nem éri és tönkre nem megy.

2. A gumi tulajdonságai

A kísérletek tanulságai alapján a húzott lágygumit terhelő σ feszültség és az ε fajlagos alakváltozás között a terhelés kezdő szakaszán egyenes arányosság áll fenn. Ez azt jelenti, hogy a gumi $E = \sigma/\varepsilon$ rugalmassági tényezője

* Dr. Dulácska Endre, Budapest XII., Ráth György u. 64.

kezdetben állandó. Ez az arányosság körülbelül az $\varepsilon = 2 \sim 3$ értékig marad meg. Ilyen nagy nyúlásnál a keresztmetszet már jelentősen lecsökken. Így annak ellenére, hogy a nyúlás a feszültséggel arányos, az erővel mégsem lesz arányos. Egy-, két-, háromszoros nyúláshoz nem egy-, két-, háromszoros, hanem ennél kisebb erő tartozik.

Ha egy gumiszálat húzunk, akkor annak eredeti l_0 hossza Δl értékkel megváltozik. E közben az egységnyi keresztirányú méret ε_k értékkel csökken.

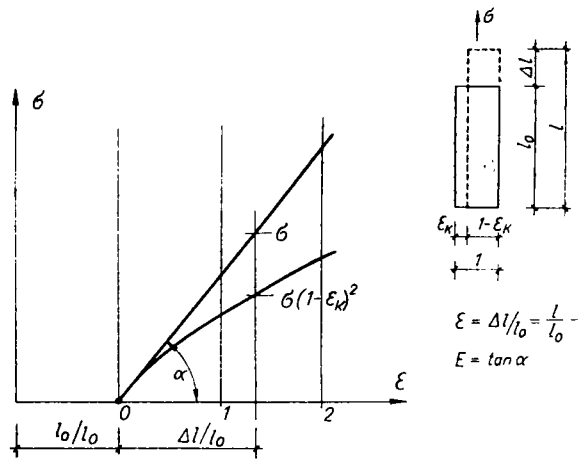
A megnyúlt állapotban az eredetileg egységnyi keresztmetszet területe a következő:

$$F = (1 - \varepsilon_k)^2 = (1 - \nu\varepsilon)^2. \tag{1}$$

A σ feszültséggel terhelt eredetileg egységnyi keresztmetszetű húzott elem a következő erőt tudja felvenni:

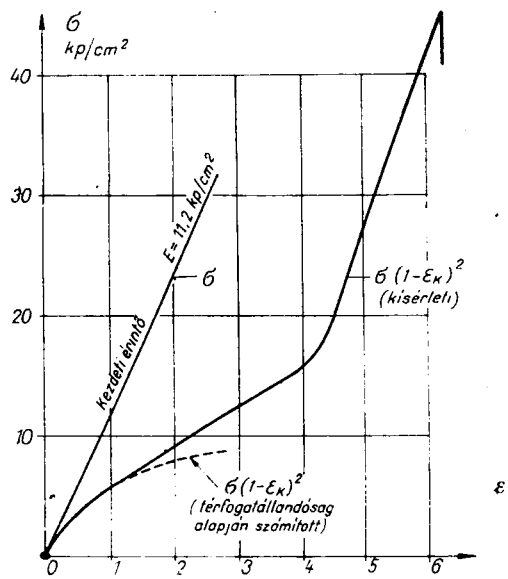
$$P = \sigma F = \sigma(1 - \varepsilon_k)^2 = \sigma(1 - \nu\varepsilon)^2. \tag{2}$$

Ebben az összefüggésben ismernünk kell a keresztirányú ε_k alakváltozást. Nagy alakváltozásról lévén szó, a Poisson-féle szám, illetve annak ν reciproka már nem használható. A kísérletek azt mutatták, hogy a húzott gumielem térfogata $\varepsilon = 1$ értékig valamelyest csökken, ezen túl pedig valamelyest növekszik [1]. E csökkenés, illetve növekedés azonban olyan kicsiny, hogy a húzott gumiszál $\varepsilon \leq 2$ értékig térfogatállandónak tekinthető. Ha a σ feszültség és az ε fajlagos nyúlás között az 1. ábrán bemutatott α hajlásszögű egyenes arányosság áll fenn, akkor az eredeti keresztmetszet egységnyi keresztmetszeti területére jutó erő és a fajlagos nyúlás közötti összefüggést az ábra görbe vonala mutatja be.



1. ábra. A nagy alakváltozású anyag erő-alakváltozásának modellje.

A 2. ábrán feltüntettük egy húzott lágygumi szálon szerző által végzett kísérletek eredményét. Az ábrán látható az ε fajlagos nyúlás és kísérleti $\sigma(1 - \varepsilon_k)^2$ fajlagos erő összefüggése, a gumi E rugalmassági tényezőjét adó kezdeti egyenes érintő, valamint a térfogatállandóság feltétele szerint az E rugalmassági tényezővel számított görbevonalú nyúlás és erő összefüggés. Látható a 2. ábrából, hogy az $\varepsilon \leq 2$ érték eléréséig a térfogatállandóság alap-



2. ábra. Lágygumi erő-alakváltozás összefüggése.

ján számított eredmény elég jól megközelíti a kísérleti eredményt. Hasonló egyezéseket kapunk, ha a BACH-BAUMANN [1] által végzett kísérletek eredményeit hasonlítjuk össze a térfogatállandóság alapján számított eredményekkel.

Ha a kritikus nyomásérték $\varepsilon \leq 2$ érték mellett következik be, akkor a keresztirányú alakváltozást kielégítő pontossággal határozhatjuk meg a térfogatállandóság alapján.

3. Gömbalakú gumiballonok

A stabilitásvesztés jelenségét, illetve a kritikus nyomás meghatározását a legegyszerűbb alak, a gömb esetében mutatjuk be.

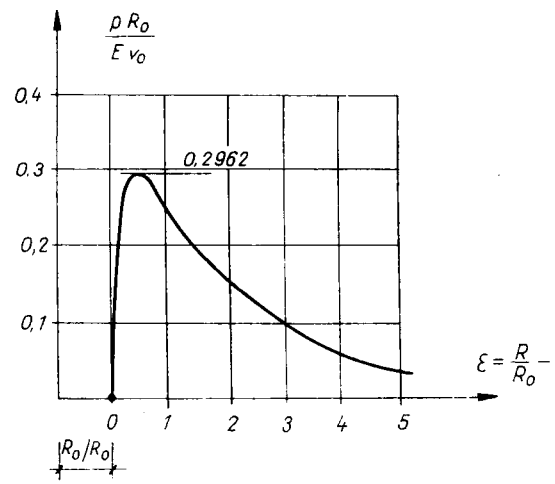
Legyen P a ballon belső felületére nehezedő túlnyomás, σ a ballon falában keletkező húzófeszültség, v a ballon változó falvastagsága, v_0 a ballon eredeti falvastagsága, R a ballon változó görbületi sugara, R_0 a ballon eredeti görbületi

sugara, E a rugalmassági tényező, és ε a fajlagos nyúlás, dq pedig az eredetileg egységnyi ívhosszhoz tartozó középponti szög.

Gömbnél a nyomás és a belső erő összefüggése a következő ismert képlettel írható le:

$$p = \frac{2n}{R}. \tag{3}$$

Az n erő kifejezhető mint a σ feszültség és a ballonvastagság szorzata, azaz $n = v\sigma$.



3. ábra. Gömbalakú gumiballon nyomás-tágulás összefüggése.

A térfogatállandóság tétele alapján felírható a következő egyenlet:

$$v_0 R_0^2 (dq)^2 = vR^2 (dq)^2. \tag{4}$$

Innen

$$v = v_0 \left(\frac{R_0}{R}\right)^2.$$

Így

$$n = \sigma v_0 \left(\frac{R_0}{R}\right)^2. \tag{5}$$

A sugár változásából az $\varepsilon = (R/R_0 - 1)$ geometriai és az $\varepsilon = \sigma/E$ alakváltozási összefüggések segítségével kifejezhetjük a σ feszültség értékét:

$$\sigma = \frac{E}{R_0}(R \quad R_0). \tag{6}$$

A (6) összefüggést az (5)-be, majd ezt a (3)-ba helyettesítve, némi átalakítással a gömb belső túlnyomásának és alakváltozásának összefüggése a következőként adódik:

$$p = \frac{2Ev_0}{R_0}\left(\frac{R_0^2}{R^2} - \frac{R_0^3}{R^3}\right). \tag{7}$$

A 3. ábrán a (7) képlet eredményét ábrázoló diagram világosan mutatja, hogy a gumiballon belső túlnyomása kritikus felső határral bír.

A szélsőérték számítással meghatározható kritikus nyomás értéke:

$$p_{\text{crit}} = 0{,}2962\,\frac{Ev_0}{R_0}, \tag{8}$$

amely $\varepsilon = 0{,}5$, azaz $R = 1{,}5\,R_0$ értéknél következik be.

4. Következtetések

a) Ha egy ballon feltöltésénél a kritikus nyomás értékét túllépjük, akkor a ballon alakváltozása a kritikus ponton túlszalad. Ezután a ballon nagyságát tetszés szerint a *nyomásértékkel* beszabályozhatjuk.

Ha a nyomásértéket állandónak tartjuk, akkor a nyúlások úgy megnövekednek, hogy a ballon tönkremegy, mert egyensúlyi helyzete csak állandóan csökkenő nyomás mellett lehetséges.

b) Egy, a kritikus nyomásértékhez tartozó alakváltozáson túl felfújt ballont külső hatással nyomjunk úgy össze, hogy nagysága a kritikus alakváltozásnál kisebb legyen. Ilyen esetben az összenyomás során a ballonban a nyomás értéke megnövekszik. Mivel a gázok nyomástörvénye értelmében a gáz nyomásának és térfogatának szorzata állandó, a megnövekedett nyomás nagyobb lesz a kritikus nyomásnál. Így a ballon elengedés után újra visszatér a kritikuson túli állapotba.

c) Ha két egyforma méretű és vastagságú ballont oly módon összekapcsolunk, hogy a túlnyomást biztosító gázanyag közlekedni tud a két ballon között, furcsa jelenség következik be. Nyomjuk össze külső erőhatással az egyik ballont annyira, hogy mérete a kritikus alakváltozáshoz tartozó méretnél kisebb legyen. Ha e mellett a másik ballonban a nyomásérték nem növekszik az első ballon kritikus nyomásértékénél magasabbra, akkor többé a nyomás növelésével semmi módon nem tudjuk az összenyomott ballont újra felfújni. Ez esetben a nyomás növekedésére a másik ballon korlátlanul kezd tágulni, majd tönkremegy anélkül, hogy az első ballon túljutna a kritikus nyomásértéken.

d) A *c)* alpontban tárgyalt jelenség különösen akkor fordul elő, ha különböző méretű ballonokat kapcsolunk össze. Ez esetben a ballonok már eredetileg

is csak a következő módon fújhatók fel. Először a kisebb méretű ballont a kritikus nyomáson túli értékre felfújják, majd elzárják. Ezután a nagyobb méretű ballont is felfújják a kritikus nyomáson túli értékre, és csak ezek után létesítenek újra kapcsolatot a két ballon között. Ilyen módszerrel mindkét ballon túljutott a kritikus nyomásértéken, és egyenlő nyomás esetén egyensúlyban is marad.

IRODALOM

1. BACH, C.—BAUMANN, R.: Elastizität und Festigkeit. V. Springer, Berlin 1924.

Stability of Rubber Balloons. A particular instance for the loss of stability is dealt with, taking place by applying pure tension. This is the case of inflatable balloons made from rubber of high elongation capacity. The phenomenon may be explained by the fact that due to the large deformation, the reduction of the cross sections strongly affects the extension of the material. The phenomenon is presented, as an example, on a balloon of spherical shape.

Stabilität von Gummiballons. Es wird ein bei der Anwendung von reinem Zug eintretender Sonderfall eines Stabilitätsverlustes behandelt. Dies ist der Fall bei aus Gummi von hoher Dehnungsfähigkeit hergestellten aufblasbaren Ballons. Die Erscheinung kann dadurch erklärt werden, dass infolge der starken Formänderung die Verminderung der Querschnitte die Dehnung des Materials stark beeinflusst. Die Erscheinung wird im Aufsatz beispielsweise auf einem kugelförmigen Ballon dargestellt.

KÖNYVISMERTETÉSEK

BETON-KALENDER 1972

TASCHENBUCH FÜR BETON- UND STAHLBETONBAU UND DIE VERWANDTEN FÄCHER

Verlag von Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin—München—Düsseldorf, I. kötet: 1205 o., II. kötet: 768 o., ábrák, táblázatok. tárgymutató

Kevés olyan mű van, mely világszerte olyan általános érdeklődésre tarthat számot, mint a Beton-Kalender, a beton- és vasbetonépítészet aktuális problémáival foglalkozó, évről évre változatos tartalommal megjelenő zsebkönyv. Ez évi kiadását, miként a múltban is, kiváló szakértő gárda élén Prof. Dr.-Ing. Gotthard FRANZ (Stuttgart), a vasbetonépítészet világhírű professzora szerkesztette.

A mű I. kötete a matematikai táblázatokon, geometriai adatokon, valamint a vasbetonépítészet anyagára vonatkozó ismereteken kívül részletesen foglalkozik a vasbeton rúd- és lemezszerkezetek erőtani problémáival, e szerkezetek méretezésével.

A mű II. kötete anyagvizsgálati kérdésekkel, építmények szigetelésével és az előregyártás kérdéseivel foglalkozik. Terjedelmes fejezet foglalja össze a vasbeton hídépítészetre vonatkozó ismeretanyagot, a falszerű tartóelemek elméletét és méretezési szabályait, végül az ún. töréselmélet alapvető tételeit és különféle alkalmazási lehetőségeit.

A számos érdekes témát tárgyaló fejezet közt különös érdeklődésre tarthat számot a falszerű tartók (táblák) szilárdságtanával foglalkozó fejezet (szerzője: Dr.-Ing. K. SCHAAK, Frankfurt). Ez az újonnan beiktatott fejezet több mint 100 oldalon át tárgyalja a falszerű tartók (táblák) rugalmasságtani elméletét, e feladatok klasszikus megoldási módszereit és különféle alkalmazási lehetőségeit. Az elméleti fejtegetéseket a gyakorlat szempontjából érdekes feladatok megoldásával magyarázza és gazdag, tanulságos ábraanyaggal illusztrálja. Bemutatja többek közt a lokálisan megterhelt táblasáv problémáját, a két szemben fekvő peremponton működő nyomó-, illetve nyíróerő hatását, a pontokon támaszkodó falszerű tartó erőjátékát stb. Mindezekben az esetekben ábrákon szemlélteti a Navier-féle és a klasszikus rugalmasságelmélet szerinti megoldások közti eltérést.

Új a töréselméletet ismertető fejezet is (szerzője: Prof. Dr.-Ing. H. DUDDECK, Braunschweig). Ez a fejezet mintegy 50 oldal terjedelemben a rúdszerkezetek és keresztmetszeteik képlékeny alakváltozásával, a plasztikus csuklók kialakulásával, a statikai és kinematikai alaptételekkel és magával a töréselméleten alapuló méretezési eljárással foglalkozik. (Itt szerettük volna megemlítve látni, hogy ennek az újszerű méretezési eljárásnak az alapgondolata hazánkfiának Dr. KAZINCZY Gábornak a nevéhez fűződik.) A tárgyalást a derék- és nyíróerők hatására vonatkozó fejtegetések zárják le.

Általában megállapítható, hogy ennek az immár hat évtizedes múltra visszatekintő zsebkönyvnek 1972. évi kiadása a korábbi tradícióknak megfelelően, ez alkalommal is híven tükrözi a vasbetonépítészet időszerű kérdéseit, részletesen tájékoztat a vasbetonépítéssel kapcsolatos kutatások pillanatnyi helyzetéről, és értékes segítséget nyújt a vasbetonépítészettel foglalkozó szakköröknek a vasbetonépítéssel kapcsolatos problémák szakszerű megoldásához.

Dr. Csonka Pál

Vörös Imre:

GÉPELEMEK II. KÖTET

Tankönyvkiadó. Budapest 1972. 2. átdolgozott kiadás. 495 oldal, 384 ábra.

Vörös Imre Kossuth-díjas professzornak, a műszaki tudományok doktorának három kötetes „Gépelemek" könyvsorozata 1957 és 1961 között jelent meg először. A közben eltelt több mint egy évtized időszerűvé tette e tankönyvsorozat teljes átdolgozását. Ennek oka e tárgykör rohamos fejlődése, a műszaki felsőoktatásban végrehajtott tanulmányi reform és több szabvány változása.

Az átdolgozott I. kötet 1970-ben jelent meg, amelyről a *Műszaki Tudomány* 44/3—4. száma 1971-ben ismertetést közölt.

Az itt ismertetendő II. kötet a tárgyalt anyagot öt főfejezetre tagolja.

Az első főfejezet lényegében három egymástól független forgómozgást közvetítő elempárt, hajtómű fajtát tárgyal. A *dörzshajtások* esetében az egymásnak szorított forgóelemek biztosítják a szükséges áttételt, míg a végetlenített rugalmas hajtások esetében (lapos, ék, fogazott) *szíjfajták* szétfeszítésével valósul meg az a súrlódó erőzáró kapcsolat, amely nagyobb tengelytávolságokra valósítja meg az előírt módosítást. Határterületet jelentenek a *láncházjtások* a rugalmas és a kényszer (alakzáró) hajtóművek között.

A második főfejezet a négytagú kulisszás mechanizmusok közül a leggyakrabban alkalmazott ún. forgattyús hajtóművekkel és ezek elemeivel: *dugattyúkkal, dugattyúrudakkal, keresztfejekkel, hajtórudakkal, végforgattyúkkal, forgattyús* (görbített, ill. könyökös) *tengelyekkel* és *excenterekkel* foglalkozik. A dugattyús gépekbeli forgattyús hajtóművek elméleti kérdései között szerepel az indikátor diagramból felépíthető ún. poláris diagram a forgattyúszög függvényében, továbbá a kiteríthető ún. tangenciális diagram, amelyből viszont az előírt egyenlőtlenségi fokra kiszámítható a *lendítőkerék* szükséges tehetetlenségi nyomatéka.

A harmadik főfejezet a siklócsapágyak címen belül tulajdonképpen több fejezetet tárgyal, éspedig: a tengelyek azon *csaprészét*, amely ágyazásra kiképzett, a *kenés* fizikai és kémiai jellemzőit (elsősorban a kenőolajok és kenőzsírok *viszkozitását)*, a *csapágykenés* alapegyenleteit a nyomásfüggvény, a súrlódási viszonyok, a hőmérsékleti viszonyok és a szükséges kenőanyag térfogatáramlásának számítása céljára. Külön pont tárgyalja a csapágyak *hidrodinamikus kenéselméletének* alkalmazását (hengeres és hézaggal illesztett *hordozó csapágyakra*, ill. *többszörös hordozófelületű csapágyakra, támasztó csapágyakra*). Ezután a *hidrosztatikus talpcsapágyak* ismertetése következik. A főfejezet befejező részében a különböző perselyanyagú és különféle célú siklócsapágyfajták *szerkezeti megoldásait* foglalja össze a szerző egy-egy példával.

A negyedik főfejezet a gördülőcsapágyak szerkezeteit, szerkezeti anyagait, típusait, szilárdsági viszonyait, méretezési (kiválasztási) szempontjait foglalja össze *golyós-*, ill. *görgőscsapágyakra*, és ezen belül is *gyűrűs-*, ill. *tárcsáscsapágyakra*. Külön pontok tárgyalják a gördülőcsapágyak esetleges *járulékos erőit*, megengedett fordulatszámait, csapágyhézagait, illesztési problémáit, szerelését, kenését, tömítését. A befejező fejezet több pontban *megvalósított példákat* mutat be.

Végül *az ötödik főfejezet* a magyar gépelem-szakirodalomban eddig mostohán kezelt rugókat ismerteti, mégpedig külön tárgyalva a húzott, a nyomott, a hajlított és a csavart rugó fajtákat és beépítésüket: a különböző szelvényű tekercselt *csavarrugókat*, a *gyűrűs rugókat*, a *réteges lemezrugókat*, a *tányérrugókat*, a *síkrugókat*, a *volut rugókat*. Külön pontok tárgyalják a *gumirugókat* és a *légrugókat*.

E kötet címoldalán ugyan nincs feltüntetve, hogy második kiadásról van szó, ennek ellenére lényegében mégis a régi „Gépelemek II" tankönyv átdolgozott kiadását tanulmányozhatjuk változatlan főfejezet-címekkel, sorrendváltoztatásokkal, célszerű rövidítésekkel, esetleges bővítésekkel, az ábraanyag ésszerű megváltoztatásával.

A „Gépelemek I" tankönyv említett ismertetésében az ilyen című könyvekkel kapcsolatos általános kérdéseket is érintettük, amelyek természetszerűleg a jelen II. kötetre szintén fennállnak, és így azoknak a gondolatoknak ismétlése itt elmaradhat.

E II. kötetet is melegen ajánljuk gépészmérnökhallgatóknak és — tudományos részértékei miatt — a főfejezetek tárgyköreit kutatóknak egyaránt. Érdeklődéssel várjuk a sorozat sajtó alatt levő III. kötetének megjelenését.

Dr. Terplán Zénó

Thamm—Ludvig Huszár Szántó:

DEHNUNGSMESSVERFAHREN

Akadémiai Kiadó, Budapest 1971, 328 oldal. 202 ábra, 25 táblázat

A most megjelent könyv tartalmilag főbb fejezeteiben a Műszaki Könyvkiadó által 1968-ban magyar nyelven kiadott, de a szerzők által 1966-ban írt „A szilárdságtan kísérleti módszerei" című könyvvel egyezik. A nyelvi különbségen kívül egyetlen lényeges eltérés az, hogy a magyar kiadásban szereplő „Optikai feszültségvizsgálat" c. fejezet kimaradt, és helyét a „Dehnungsmessung mittels Moiré-Bilder" c. fejezet foglalta el.

„A szilárdságtan kísérleti módszerei" c. könyvet Dr. MICHELBERGER Pál a „Műszaki tudomány" 42. 1970. 401. oldalán már ismertette, ezért a magyar kiadással megegyező fejezetek újra ismertetése, illetve értékelése felesleges lenne.

Általánosságban azonban meg kell jegyezni, hogy a könyv kiadása hazai viszonylatban hézagpótló és külföldi érdeklődésre is számot tart. Jelentősége az, hogy összegyűjti azokat a legfontosabb nyúlásmérési módszereket, amelyek segítségével a mérnöki szerkezetek erőjátéka pontosabban megállapítható, és ennek révén a szerkezetek biztonságosabban és gazdaságosabban méretezhetők. Különösen szerencsés a szerzőknek az a törekvése, hogy a könyvben az elmélet mellett a gyakorlati tapasztalatokat is igyekeztek közzétenni, és így elsősorban azoknak adnak komoly segítséget, akik a mérési módszereket alkalmazni is kívánják.

Az önálló fejezetként szereplő, a Moiré-módszert ismertető rész röviden összefoglalja a síkbeli feszültségállapot, az optikai feszültségmérés és a lemezszerkezetek vizsgálatánál egyre nagyobb teret hódító kísérleti módszert. A jelentős gyakorlatot kívánó módszer lényege az, hogy a vizsgált modellre vagy próbatestre egy sűrű, párhuzamos vonalakból álló matricát rögzítenek, majd a vonalsereg eredeti és próbatesten bekövetkező deformációval azonosan deformált alakzatát egymásra fényképezve a jelentkező „Moiré-vonalak"-ból állapítják meg a próbatest deformációit (nyúlás, szögelfordulás, vastagságváltozás stb.).

Kár, hogy a német nyelvű kiadásból a kísérleti feszültséganalízisnek egy olyan fontos és nagy múltra visszatekintő fejezete, mint az optikai feszültségmérés, kimaradt.

A könyv megírásától a német nyelvű kiadás megjelenéséig eltelt öt év magyarázza azt, hogy néhány műszerre vonatkozó utalás már nem eléggé időszerű. Ezalatt az idő alatt a technika rendkívül gyors fejlődése következtében, elsősorban a statikus mérések vonatkozásában olyan automatikus mérő-, regisztráló- és adatfeldolgozó rendszereket fejlesztettek ki, amelyek ismertetése a könyv időszerűségét és használhatóságát nagy mértékben fokozta volna. A mérési eredmények számítógépi feldolgozására csupán a röntgen feszültséganalízis keretében történik rövid utalás, holott ma már korszerűen felszerelt laboratóriumokban ez a méréstechnika minden területen elengedhetetlen.

Szittner Antal

KIIGAZÍTÁS

A *Műszaki Tudomány* 45/1—2 füzetében PROHÁSZKA János levelező tag "Hexagonális kristályok sztereografikus pólusábráinak meghatározása szerkesztés nélkül" c. cikkének 5. és 6. ábrája, mely külön lapon készült, a kötészetben lemaradt. A két ábrát pótlólag mellékeljük.

A szerkesztőség

Printed in Hungary

A kiadásért felel az Akadémiai Kiadó igazgatója — Műszaki szerkesztő: Helle Mária

A kézirat nyomdába érkezett: 1972. VII. 6. — Terjedelem: 17,15 (*A*/5) ív

72.73857 Akadémiai Nyomda, Budapest — Felelős vezető: Bernát György

TARTALOMJEGYZÉK

Geszti, P. Ottó—Patkó János: Szigetelt fázisvezetőjű szabadvezeték 273
Terplán Zénó: Az általános és kompenzált fogazat szerkesztő módszerei a fogaskerék-bolygóművekben 287
Bitó János: A hőionos generátorok 315
Bosznay Ádám: A rugalmasságtan nemzetközi és hazai dinamikai kutatásainak áttekintése; javaslat a hazai ilyen irányú kutatásokra 305
Michelberger Pál: Járműszerkezetek pontatlan gyártásából ébredő szerelési feszültségek számítása 331
Bitó János—Antal Kálmán: A kapacitív kisülések felépüléséről 343
Faragó K. és munkatársai: A városépítés tudományos művelése 367
Kator Lajos—Artinger István—Czoboly Ernő: Melegen dolgozó szerszámacélok 383
Kazinczy László: A szerszám és anyag kölcsönhatása a forgácsolásban 411
Henk Károly—Pataki György: Impulzus üzemű termikus letörés vizsgálata Ge-ban és Si-ban 423
Demeter Sándor—Pataki György: A stacioner termikus letörés germániumban és szilíciumban 435
Bitó János—Bolla István: A tértöltésmentes sötétkisülések fontosabb jelenségeiről 443
Dulácska Endre: Gumiballonok stabilitása 457

KÖNYVISMERTETÉS

Beton-Kalender 1972 (Csonka, P.) 463
Vörös Imre: Gépelemek II. (Terplán Zénó) 464
Thamm—Ludvig Huszár—Szántó: Dehnungsmessverfahren (Szittner A.) 465

CONTENT

Geszti, P. O.—Patkó, J.: Overhead Lines with Insulated Phase Conductors 273
Terplán, Z.: Graphical Methods for Designing General and Compensated Gearing in Planetary Gear Trains 287
Bitó, J. F.: The Thermionic Generators 315
Bosznay, Á.: Survey of the Research Work on the Theory of Elasticity in Hungary and in Foreign Countries; Suggestion for Performing such Investigations in Hungary 305
Michelberger, P.: Calculation of Mounting Stresses Induced by Inaccurate Manufacturing of Vehicle Frameworks with the Aid of the Matrix Force Methods 331
Bitó, J. F.—Antal, K.: On the Building-Up of Capacitive Discharges 343
Faragó, K.: Scientific Town Building 367
Kator, L.—Artinger, I.—Czoboly, E.: Hot-Working Tool Steels 383
Kazinczy, L.: Summary of the Situation Report on „The Mutual Action of the Tool and the Material in Machining" 411
Henk, K.—Pataki, Gy.: Investigation of the Thermal Breakdown in Ge and Si during Pulse Operation 423
Demeter, S.—Pataki, Gy.: Stationary Thermal Breakdown in Ge and Si 435
Bitó, J. F.—Bolla, I.: On the More Important Phenomena in Dark Discharges without Space Charges 443
Dulácska, E.: Stability of Rubber Balloons 457

BOOK REVIEW

Beton-Kalender 1972 (Csonka, P.) 463
Vörös I: Gépelemek (Maschinenelemente) II. (Terplán Z.) 464
Thamm—Ludvig Huszár Szántó: Dehnungsmessverfahren (Szittner, A.) 465

INHALTSVERZEICHNIS

Geszti, P. O.—Patkó, J.: Freileitungen mit isolierten Phasenleitern 273
Terplán, Z.: Zeichnerische Verfahren für den Entwurf von allgemeinen und kompensierten Verzahnungen für Zahnrad-Planetengetriebe 287
Bitó, J. F.: Die thermionischen Generatoren 315
Bosznay, Á.: Eine Übersicht über die in Ungarn und im Ausland laufenden Forschungsarbeit in Bezug der Theorie der Elastizität; Vorschlag zur Anstellung solcher Untersuchungen in Ungarn 305
Michelberger, P.: Berechnungen der durch die Fertigungsungenauigkeiten des Fahrgestells hervorgerufenen Montagespannungen mit Hilfe des Matrizen-Kraftgrößen-Verfahrens 331
Bitó, J. F.—Antal, K.: Über den Aufbau von kapazitiven Entladungen 343
Faragó, K.: Wissenschaftlicher Städtebau 367
Kator, L.—Artinger, I.—Czoboly, E.: Warmarbeitende Werkzeugstähle 383
Kazinczy, L.: Zusammenfassung des Situationsberichts „Wechselwirkung des Werkzeugs und des Werkstoffs bei der Zerspanung" 411
Henk, K.—Pataki, Gy.: Untersuchung der thermischen Durchschlags in Ge und Si bei Impulsbetrieb 423
Demeter, S.—Pataki, Gy.: Stationärer thermischer Durchschlag in Ge und Si 435
Bitó, J. F.—Bolla, I.: Über die wichtigeren Erscheinungen in den Raumladungsfreien Dunkelentladungen 443
Dulácska, E.: Stabilität von Gummiballons 457

BUCHBESPRECHUNG

Beton-Kalender 1972 (Csonka, P.) 463
Vörös, I.: Gépelemek (Maschinenelemente) II. Teil (Terplán, Z.) 464
Thamm—Ludvig—Huszár—Szántó: Dehnungsmessverfahren (Szittner, A.) 465

СОДЕРЖАНИЕ

П. О. Гести, Я. Патко: Воздушная линия электропередачи с изолированным фазовым проводом 273
З. Терплан: Методы конструирования общей и компенсированной систем зубьев для зубчатых планетарных передач 287
Я. Бито: Термоинные генераторы 315
А. Боснаи: Обзор международных и венгерских динамических исследований в области пластичности; предложение относительно исследований по данной теме в Венгрии 305
П. Михельбергер: Расчет монтажных напряжений конструкций транспортных средств, вытекающих из неточности производства 331
Я. Бито, К. Антал: О построении емкостных разрядов 343
К. Фараго: Научный подход к вопросам градостроения 367
Л. Катор, И. Артингер, Э. Цобой: Инструментальные стали, работающие в горячем режиме 383
Л. Казинци и сотр.: Взаимодействие между инструментом и материалом при резании 411
К. Хенк, Д. Патаки: Исследование термического пробоя импульсного режима для германия и кремния 423
Ш. Деметер, Д. Патаки: Стационарный термический сробой в германии и кремнии 435
Я. Бито, И. Болла: О важнейших явлениях беззарядных темных разрядов 443
Э. Дулачка: Стабильность резиновых баллонов 457

ОБЗОР КНИГ

Бетонный календарь 1972 (П. Чонка) 463
Имре Вереш: Элементы машин, II (Зело Терплан) 464
Там Людвиг—Хусар—Санто: Методы измерения растяжения (расширения) (А. Ситнер) 465

Megjelent 1973. I. 18.

Index: 26.499