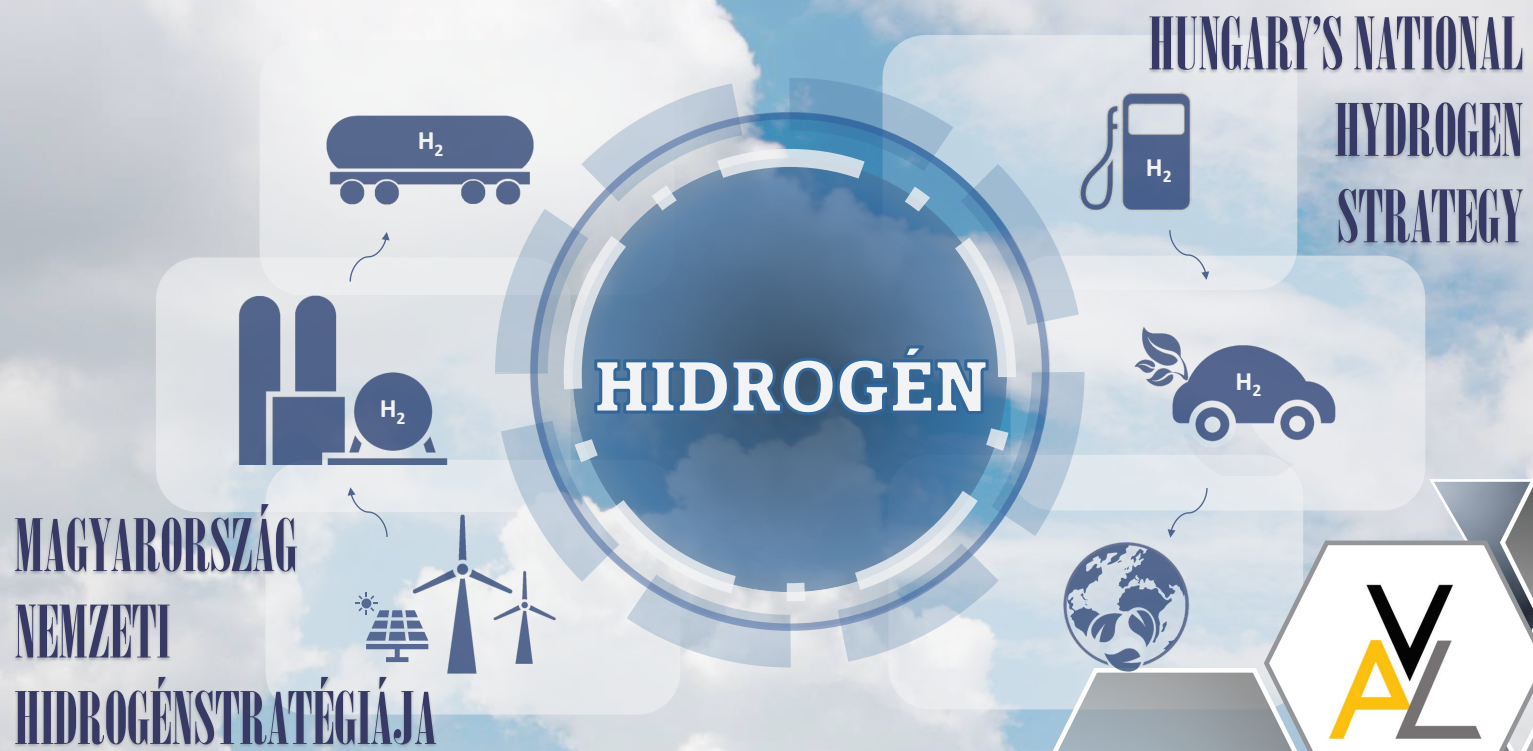


Anyagvizsgálók Lapja

Az Ország vezető szaklapja



A lap kiemelt
támogatója:

MAE

Magyar Anyagvizsgálók
Egyesülete (MAE)

A hidrogén
okozta károsodás
szaknyelve

Előállítás,
Tárolása,
Szállítása

Atomerőművek
szerepe

VASKUT
története
II. rész

Hazai új kutatás:
PEM-cella

Mi a helyzet a
szomszédban?
Ausztria

Paks II
munkacsoport

Európai
Szerkezetintegritási
Társaság (ESIS)
I. rész

ESIS
European Structural Integrity Society

European Conference on Fracture ECF23, 2022
Fracture Mechanics and Structural Integrity, June 27 - July 5, 2022
Organized by ESIS - European Structural Integrity Society

Portrék:
Oláh György,
MAE elnökök,
Czoboly Ernő

**2022/II.
lapszám**



Forrástól a fogyasztóig

A teljes hidrogén értéklánc

A tiszta energiaforrások – mint például a hidrogén – iránti keresletnövekedéssel nőni fog az olyan vállalatok iránti igény is, amelyek kellő szakértelemmel rendelkeznek a hidrogén előállításában, feldolgozásában, elosztásában, és képesek megfelelő módon azt a felhasználás helyére szállítani. A Linde több mint 100 évnyi tapasztalattal rendelkezik a hidrogén (H_2) előállításában és több mint 25 éve élenjáró a H_2 technológiák fejlesztésében, kutatásában, továbbá részt vállal kiemelt mobilitási projektek megvalósításában. Erre a jelentős tapasztalatra és széles technológiai portfólióra építve már most készen állunk tömeges alkalmazásra szánt, működőképes, gazdaságilag életképes hidrogénteknológiák szállítására.



Eddig már több mint félezer felépített üzem

Mi vagyunk az egyetlen olyan vállalat, amelynek működése kiterjed a hidrogén értéklánc minden egyes szakaszára, az előállítástól és feldolgozástól kezdve (beleértve a tisztítást és cseppfolyósítást is), a disztribúción és tároláson át, a mindennapi ipari- és fogyasztói felhasználásig. A mai napig több mint 500 H_2 termelőüzemet építettünk világszerte a kisméretű üzemektől a nagyméretű létesítményekig, amelyek közül több mint százat a Linde szakemberei üzemeltetnek. Ezek az üzemek mindenféle petrokémiai nyersanyagot képesek kezelni, a földgáztól kezdve, a nehézőlajon át, egészen a szénig. Az olyan technológiai folyamatok, mint a gőzzel történő metánreformálás, elgázosítás és parciális oxidáció kihasználásával, H_2 üzeink kiemelkedően hatékony módot kínálnak a hidrogént és szén-monoxidot tartalmazó szintézisgáz, valamint az olyan termékek, mint például az ammónia előállításához. Előre tekintve a kibocsátásmentes hidrogén energiagazdaság irányába, megalkottuk a zöld hidrogéntermelő üzemeket, amelyek a megújuló energiaforrások segítségével működnek, ezáltal a CNG kiváltásában is segítséget nyújtanak, hozzájárulva a karbonsemlegesség eléréséhez.

A szolgáltatás is professzionális

A megbízható gázellátáson és a legkorszerűbb, szabványosított üzemanyag-töltőállomás rendszereken túl, professzionális szolgáltatásokat is kínálunk, hogy biztosítsuk ügyfeleink számára a hidrogénüzemű mobilitással kapcsolatos beruházásaik sikerességét. Ezen a területen megszerzett több évtizedes tapasztalatunkra építve az ilyen szolgáltatásaink magukba foglalják a teljes körű projekt kivitelezéstől kezdve, a karbantartáson és javításon át, az expressz alkatrészszállításokat is. A megbízható működés biztosítása érdekében ügyfeleink számára távfelügyeletet és optimalizált szervizelési és karbantartási koncepciókat is kínálunk. Mindezek mellett tanácsadóink örömmel együttműködnek ügyfeleinkkel, és segítenek az egyéni vagy speciális igények megvalósításában – legyen szó nagyobb töltési kapacitásokról, kombinált töltési modellekről vagy meglévő töltőállomásokba történő integrációról. Globális jelenlétünknek köszönhetően ezek a szolgáltatásaink világszerte elérhetők.

Rendelkezünk saját hidrogén elektrolizáló üzemek, illetve hidrogéntöltő állomások gyártásával foglalkozó tagvállalatokkal. Ezen vállalatok által gyártott töltőállomásokat a Linde saját szakembereivel megtervezi, kivitelez, üzemelteti, karbantartja, és amennyiben szükséges akkor tartalékellátást is tud biztosítani.

www.lindegas.hu

H_2

Mélyen tisztelt Olvasóim!



Örömmel és felcsigázva ültem le a megújult Anyagvizsgálók Lapja JEGYZET rovatának összeállításához. Az ok kettős. Egyrészt munkatársaim jóvoltából biztosan egy izléeses, szép kivitelű számot adhatunk az Önök kezébe, másrészt a témakör, a hidrogén – mint energiaforrás – lehetséges szerepe a jövő gazdaságában mindenképpen túlmutat a jelen minden-napjain, és a közeljövő hétköznapijait formálhatja.

„Tekints a múltba és meglátod a jövőt” gondolatot sok nyelven, helyen és időben megfogalmazta már a gondolkodó emberi elme, tehát innen kell indulni. Az 1800-as évek elején megjelent gőzgép alkalmazása a vasúti közlekedésben teljesen átalakította az emberiség gazdasági és társadalmi kapcsolatrend-szerét azzal, hogy a természeti források, a termékek és emberek tömegszerű mozgását tette lehetővé. Az átalakulás mikéntjének kifejezője lehet az a tény is, hogy az 1825. szeptember 27-én Stockton és Darlington közöt-ti néhány 10 km hosszúságú vasútvonal a századfordulóra 800.000 km-re növe-kedett. Ez évi több mint egy Budapest-Los Angeles távolság, természetesen a maga előnyeivel és hátrányaival. Ez utóbbiak közül kiemelendők, Földünk első érzékelhető sebeit a szükséges talpfák miatti erdők csökkenése és a különböző nyersanyagok bányászatának nyomai ütötték.

A tudomány azonban mindig előbbre tart. A XIX. század tudománya azonban megteremtette a XX. század mindennapjainak kényelmét is a villamosenergia ipar megalapozásával. Michael Faraday (1791-1867) 1831-ben felfedezte az elektromágneses indukciót, Jedlik István (szerzetesrendi keresztnéve: Ányos) 1861-ben megismerte a dinamó elvét (sajnos nem mutatta be a nyilvánosság előtt), Werner von Siemens hat évvel később, 1867-ben nem csupán ugyanarra a következtetésre jut, mint Jedlik, hanem a széleskörű bemutatás mellett meglátja a hasznosítás lehetőségét is. „A Menlo Park-i varázsló”, Thomas Alva Edison 1879-ben a mintegy emberöltőnyi tapasztalatok alapján megalkotja a sorozat-gyártásra alkalmas izzólámpát, amely villanyvilágítás világméretű elterjedésének kiindulópontja. Párizsban 1881. augusztus 15. és november 15. között megszervezik a „Villamosság Nemzetközi Kiállítását”, amelyen részt vesznek a korszak szakmai meghatározó egyéniségei mellett azok is, akik mindezt üzleti szempont-ból mérlegelik. Így az üzleti életben tradicionálisan részt vevő család sarja is, Emil Rathenau (1838-1915), aki Edison szabadalmak bizonyos hasznosítási jogait megvásárolja és bankjának tanácsára versenytársával (Siemens-el) közös céget hoz létre a villamosipari termékre, megteremtve ezzel az európai villamosipari óri-áscéget az AEG-t (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft-ot). Rathenau már 1884 elején Berlin villamosítására szerződést ír alá. Ez mintaeértékű és végigsöpör a világ összes nagyvárosán. A villamosenergia termelésének tudományos háttere ismert, technológiai megvalósításának eszközei a generátorokkal és dinamókkal biztosíthatók. Az alapelv, a mechanikai munka átalakítása különböző meghajtású turbinákkal forgási energiává. Ezzel megindulhatott az elektromos áram általá-nos felhasználása, mint a mindennapi élet nélkülözhetetlen eszköze. A turbina „business” a gazdaság alapelemévé vált, a gépek forgatására gőzt vagy gázt alkalmaznak a földünk által évmilliók során létrehozott fosszilis energiafor-rásokkal¹. Az legfőbb energiaforrásunk olajból még kb. 50 évre, a gázra pedig 150 év időtartamra biztosított². A „hogyan tovább emberiség” kérdése minden olyan gondolkodót foglalkoztatja, aki a „Jegyzet rovat” mottójául választott „frázisra” pillant. Közöttük az öt éve elhunyt Nobel-díjas Oláh Györgyöt is, aki gondolatait a „Kőolaj és földgáz után:...” c. könyvében éppen 15 éve foglalta össze. Lapunk jelenlegi száma az általa is megfogalmazott kérdéskörre fókuszál.

Tóth László
felelős szerkesztő

ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA

A Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség
(MAROVISZ) kiadványa,

az ország vezető szaklapja.
Alapítva: 1991-ben.

Országos, iparágakat átfogó, szakmai folyóirat a minőségért
és biztonságunkért.

Kiadó:

Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség
cím: 1191 Budapest, Üllői út 206., B. ép. II. lh.
tel.: +36 1 / 278 0632;
fax: +36 1 / 278 0633;
e-mail: marovisz@marovisz.hu

Szerkesztőség:

felelős szerkesztő: Dr. Tóth László
tel.: +36 30 932 2690
e-mail: info@anyagvizsgaloklapja.hu
avilap.szerk@gmail.com

Szerkesztőbizottsági tagok:

Dr. Tóth László (felelős szerkesztő)
Dr. Trampus Péter (felelős kiadó)
Dr. Dudra Judit (főszerkesztő)
Erdei Réka (digitális szerkesztő)

Hazai szerkesztőbizottsági tagok:

Dr. Divós Ferenc
Fodor Olivér
Kecskés Péter
Dr. Koncsik Zsuzsanna
Lutor Attila
Dr. Mankovits Tamás
Skopál István
Szűcs Pál

Nemzetközi szerkesztőbizottsági tagok:

Dr. Bitay Enikő (Románia)
Dr. Djorde Dobi (Szerbia)
Dr. Duszta János (Szlovákia)
Dr. Kristián Máthi (Cseh Köztársaság)
Dr. Major Zoltán (Ausztria)

Az elektronikus folyóirat szerver háttérét biztosítja:

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

Az Anyagvizsgálók Lapja honlapja:

www.anyagvizsgaloklapja.hu



¹ Termuehlen H.: 100 Years of Power Plant Development. ASME Press. New York. 2001

² <https://www.worldometers.info/hu/> (Letöltve: 2022.04.17.)

TARTALOMJEGYZÉK - CONTENT

TÓTH László Jegyzet Note	3
ANYAG, ANYAGSZERKEZET – MATERIAL, MATERIAL STRUCTURE	
DOBRÁNSZKY János, BITAY Enikő, KATULA Levente, VARBAI Balázs A hidrogén okozta károsodások szaknyelvének alapvető terminológiája Basic terminology in the technical language of hydrogen damage	6
TÓTH László, Guy PLUVINAGE, Julien CAPELLE A hidrogén szerepe a földgázvezeték tervezésében, üzemeltetésében és karbantartásában Role of hydrogen addition on design, operation and maintenance of gas networks	10
VARBAI Balázs, KATULA Levente, DOBRÁNSZKY János A hidrogén tárolásának és szállításának lehetőségei The possibilities of hydrogen storage and transportation	16
MÉRŐ Tamás, LOVAS László A hidrogén hatása egyes acélok mechanikai tulajdonságaira Effect of hydrogen on the mechanical properties of certain steels	22
MAJOR Zoltán Példák Ausztriából zöld hidrogén előállítására napenergiával – "a szomszéd hidrogénje/üzemanyagtöltő kútja mindig zöldebb" Examples from Austria of green hydrogen production from solar energy – "your neighbour's hydrogen/fueling well is always greener"	25
IMRE Attila Rikárd, HORVÁTH Ákos Az atomerőművek szerepe a hidrogén-előállításban Utilization of nuclear power plants for hydrogen production	32
KERESZTY Balázs, BRAUN Barnabás, VIDA Ádám, TOMPOS András, SZIJJÁRTÓ Gábor PEM tüzelőanyag-cella új anyagtechnológiai áramlási mezővel PEM Fuel Cell with a flow field used a new material technology	36
DOKTORANDUSZ HALLGATÓK CIKKETI – PAPERS OF PHD STUDENTS	
GÁL Viktor, LUKÁCS Zsolt, KOVÁCS Péter Zoltán Nagyszilárdságú acéllemezek törési határ alakváltozásának vizsgálati módszerei Investigation methods for determining fracture strains of high strength steel sheets	41
MECHANIKAI VIZSGÁLATOK – MECHANICAL TESTING	
TOPA Martin, TÓKA Bence, BÉRES Levente Sándor, KOVÁCS Sándor Kompozit filamentek 3D nyomtathatósági vizsgálata Investigation of the 3D printability of some composit filaments	48
PORTRÉ – PORTRAIT	
TÓTH László A Magyar Anyagvizsgálók Egyesületének Elnökei - Gállik István (1924-1927) Presidents of the Hungarian Association for Material Testing - István Gállik (1924-1927)	54
HARGITTAI István Az eszközök dicsérete – Tisztelet Oláh Györgynek In praise of instruments – Homage to George A. Olah	58

HÍREK – NEWS

TÓTH László Egy kitüntetés margójára, Czoboly Ernő, Magyar Érdemrend Tisztikeresztje, polgári tagozata 2022 On the margins of an award, Ernő Czoboly, Honorary Officer Cross of the Order of Merit (civilian) of Hungary	61
FODOR Olivér Balatoni Ankét résztvevőinek látogatása Répcelakon Visit of Balaton Ankét participants to Répcelak	67
TÓTH László Könyvismertetés: A. A. Dubov: Metall Magnetic Memory Method. Purpose and practical capability Book review: A. A. Dubov: Metall Magnetic Memory Method. Purpose and practical capability	70
TRAMPUS Péter A Dunaújvárosi Kompetencia Központ és az újonnan alakult "Paks II" munkabizottság; tervek, célok... The Competence Centre of Dunaújváros and the newly formed "Paks II" working committee; plans, objectives...	72
SZÁVAI Szabolcs, TRAMPUS Péter Európai Szerkezetintegritási Társaság (ESIS) – I. rész European Structural Integrity Society (ESIS) – Part I.	74

BEMUTATJUK... – INTRODUCING...

FEHÉRVÁRI Attila A Vasipari Kutató Intézet 70 éves-jubileuma (1952-2022) – II. rész 70th anniversary (1952-2022) of the Research Institute for Ferrous Metals – Part II.	76
---	----

A hidrogén okozta károsodások szaknyelvének alapvető terminológiája

Basic terminology in the technical language of hydrogen damage

Dobránzky János^a, Bitay Enikő^b, Katula Levente^c, Varbai Balázs^d

^aEötvös Loránd Kutatási Hálózat, MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport; BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, tudományos tanácsadó, Dobranszky.Janos@eik.bme.hu

^bSapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, egyetemi tanár, Bitay.Eniko@eme.ro

^cBME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, egyetemi docens, katula.levente@gpk.bme.hu

^dBME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, adjunktus, varbai.balazs@gpk.bme.hu

Kulcsszavak

terminológia, károsodás, hidrogén, törés, korrózió

Keywords

terminology, damage, hydrogen, fracture, corrosion

Absztrakt

A cikk a nemzetközi, európai és magyar szabványokban megtalálható szakkifejezések bázisán ismerteti a hidrogén okozta károsodások tárgyalásának szaknyelvében használni kívánatos szakkifejezéseket. A munka a szakkifejezések megnevezése és meghatározása mellett indokolásokat és magyarázatokat is tartalmaz, különösen olyan esetekben, ahol a jelenlegi helytelen gyakorlatot ideje lenne végre kijavítani.

Abstract

The article describes the terms that are desirable to use in the technical language for discussing hydrogen damage based on the terms found in international, European and Hungarian standards. In addition to naming and defining technical terms, the work includes justifications and explanations, especially in cases where it would be time to finally correct the current wrong practice.

1. Bevezetés

Az anyagvizsgálók immár öt emberöltővel ezelőtt szakmai szervezetet hoztak létre, amit az a felismerés is hajtott, hogy folyamatosan szükséges alakítani, fejleszteni és összehangolni a szakma nyelvét. Ez a feladat nem csak azért lényeges, mert az anyagvizsgáló eljárássok és az értékelési módszerek fejlődnek, hanem azért is, mert az anyagvizsgálóknak végzettségre, képesítésre, tanúsítványokra lehet szükségük a műszaki biztonság fenntartásában rájuk eső felelősség betöltéséhez. A szakmai feladatok ellátásához pedig alapvető eszköz az erős szaknyelvi megalapozottság.

A szaknyelvi alapokat az oktatási és képzési rendszernek kell kialakítania, majd pedig a továbbképzési, minősítési és tanúsítási rendszereknek fejleszteni, mégpedig a szabványosítási rendszerre építve. Ha ezek a rendszerek nincsenek egymással összehangolva, akkor gyorsan szétesik és zavarossá válik a szaknyelv. Az összhangot természetes módon képesek megalapozni a szabványok. Ehhez azonban nem elég azokat „megszerezni”, és fanyalogni azon, hogy miért nincsenek meg magyarul. Márpedig mára, sajnos, ez a hozzáállás egyre általánosabb szinte az összes mérnöki szakmában.

Ennek a cikknek a szándéka az, hogy elindítson egy olyan közös munkát, amely az anyagvizsgálók szakmai területén, egy adott témakörben, összegyűjtse a legfontosabb szakkifejezéseket; a helyes szaknyelv alapja ugyanis a helyes terminológia.

Jelen esetben, a lapszám témaköréhez illeszkedve, a hidrogén okozta anyagkárosodások szabványos terminológiáját foglaljuk össze.

2. A hidrogén okozta károsodások szabványos terminológiája

A cikkben tehát a terminológiai alapozást végezzük el a hidrogén okozta anyagkárosodásokhoz kapcsolódóan a nemzetközi szabványokban [1]–[20] szereplő szakkifejezéseknek a bemutatásával. Az immár szinte kizárólag nem magyar nyelvű szabványokból származó

szakkifejezéseket és meghatározásukat magyar nyelvre fordítottuk, de megadjuk a kifejezés angol eredetijét is. A tartalmi csoportosítás szintén saját rendszerezési módszertant követ. Az itt összegyűjtött szakkifejezéseken kívül számos más szakkifejezés is létezhet, de azokra nem térünk ki.

Felhívjuk a figyelmet arra, hogy a nemzetközi szabványok terminológiai fejezetei teljesen szabadon hozzáférhetők, ezért minden tisztelt olvasót arra biztatunk, hogy máris keresse fel az ISO onlajn keresőjét, és tetszés szerint ellenőrizze – az ott megtalálható, angol nyelvű definíció alapján – az itt közölt magyar fordítások helyességét. Nagyon örvendetes lenne, ha visszajelzéseikkel segítenék a magyar szaknyelvi terminológia pontosítását, fejlesztését.

2.1 Az általános károsodásmélet alapvető szakkifejezései

károsodás = A szerkezet állapotának változása, ami kedvezőtlenül befolyásolhatja a szerkezet működési jellemzőit [*damage*; ISO 2394:2015, ISO 8930:2021].

tönkremenetel = Egy szerkezet vagy alkatrész képességének elvesztése valamely meghatározott funkciójának végrehajtására [*failure*; ISO 13823:2008, ISO 8930:2021].

repedés = Többé-kevésbé síkbeli, üreges folytonossági hiány az acélban [*crack*; MSZ EN 10229:1999].

megrepedés = Folytonossági hiány formájában bekövetkező károsodás a felületen vagy egy tárgyon belül [*cracking*; ISO 5127:2017]. Célszerű megkülönböztetni magyarul is az angol „crack” és a „cracking” kifejezéseket.

törés = Jelenség, mely akkor következik be, amikor a próbadarab teljes szétválása megtörténik [*fracture*; MSZ EN ISO 6892-1:2020].

képlékeny törés, szívóstörés = Az anyag vagy a szerkezet tönkremeneteli módjának az a típusa, amelyet általában nagymértékű képlékeny alakváltozás előz meg [*ductile fracture*; ISO 14623:2003].

ridegtörés = Katasztrófális tönkremeneteli mód az anyagban vagy a szerkezetben, ami általában előzetes képlékeny alakváltozás nélkül és rendkívül nagy sebességgel

megy végbe [*brittle fracture*; ISO 14623:2003].

rideg repedés = Kb. 300 m/s vagy annál nagyobb sebességgel terjedő repedés ridegtörés miatt [*brittle crack*; ISO 20064:2019].

elridegedés = Az anyag szívósságának súlyos mértékű elvesztése. Az acélokból az elridegedés különféle formái jelentkezhetnek, például: kéktörékenységi, megeresztési ridegség, edzési öregedés, szigma-fázis okozta elridegedés, alakítási öregedés, termikus elridegedés, kis hőmérsékleti elridegedés [*embrittlement*; ISO 4885:2018].

hidrogéndiffúzió = A hidrogén terjedése és kölcsönhatása az acél mikroszerkezetében lévő fémtani formációkkal (mikrorepedések, diszlokációk, kiválások, zárványok, szemcsehatárok stb.), amelyek a kötőelem anyagában hidrogéncsapdák területeit képezik; ezek lehetnek nem visszafordítható csapdák (nagy kötési energiák és a hidrogén felszabadulásának kis valószínűsége jellemzi őket) és visszafordítható csapdák (kis kötési energiákkal és a hidrogén könnyebb felszabadulásával jellemezhetők) [*hydrogen diffusion*; ISO/TR 20491:2019].

hidrogénkiáramlás = A hidrogén kifelé irányuló vándorlása a kötőelem anyagból, ami a koncentrációgradiens miatt természetes módon, környezeti hőmérsékleten, avagy termikus hajtóerő, pl. kiizzítás, eredményeként megy végbe [*hydrogen effusion*; ISO/TR 20491:2019].

hidrogéncsapda = Mikroszerkezeti hely, ahol a hidrogénatom tartózkodási ideje hosszú a rácspontközi (interstíciós) helyeken való tartózkodási idejéhez képest [*trap*; ISO 8044:2020].

2.2 A hidrogénes károsodásokhoz kapcsolódó, alapvető szakkifejezések

hidrogénes elridegedés = A fém alakíthatósági tulajdonságainak olyan káros változása, amelyet a hidrogénnek való kitettség okozhat [*hydrogen embrittlement (HE)*; ISO/TR 15916:2015].

Olyan folyamat, amely a fém szívósságának vagy alakíthatóságának csökkenését okozza a hidrogén elnyelése miatt [*ISO 8044:2020*].

belső hidrogénes elridegedés = A gyártási folyamatokból származó, maradék hidrogén által okozott elridegedés, amely a kötőelemek késleltetett rideg törékenyenit okozza terhelés által előidézett és/vagy maradék húzófeszültség hatására.

A hidrogén forrása lehet a hőkezelés (különösen a gázcementálás), a savas tisztítás, a pácolás, a foszfátózás és a galvanizálás [*internal hydrogen embrittlement (IHE)*; ISO 1891-2:2014].

környezeti hidrogénes elridegedés = Az üzemi körülményekből atomos hidrogénként elnyelt hidrogén által okozott elridegedés, amely a kötőelemek késleltetett rideg törékenyenit idézi elő húzófeszültség (terhelés által előidézett és/vagy maradék húzófeszültség) hatására.

A hidrogént korróziós folyamatok (pl. a katódos védelem mechanizmusa, a hidrogén által indukált feszültségi korróziós megrepedés) vagy más környezeti források hozzátárnak [*environmental hydrogen embrittlement, EHE*; ISO 1891-2:2014].

hidrogén által előidézett megrepedés, belső szétválás = Síkbeli megrepedés a fémekben ama feszültségek által előidézve, amelyeket a fémbe bediffundáló atomos hidrogén okoz akkor, amikor molekuláris hidrogént képez a hidrogéncsapdákban [*hydrogen-induced cracking, HIC*; ISO 8044:2020(en), *décohésion interne*; ISO 8044:2020(fr)].

hidrogénes feszültségi megrepedés = Repedési jelenség a fémekben lévő hidrogén jelenléte és a (maradó vagy alkalmazott, vagy mindkét fajta) húzófeszültség miatt.

A hidrogénes feszültségi repedés (HSC) olyan fémek megrepedését írja le, amelyek nem érzékenyek a szulfidos feszültségi korróziós megrepedésre (SSCC), de amelyeket a hidrogén elridegíthet, ha katódként galvanikusan kapcsolódnak egy másik fémhez, amely anódként aktívan korrodálódik. A megrepedésnek erre a mechanizmusára a „galvanikusan előidézett HSC” kifejezést is használták [*hydrogen stress cracking, HSC*; ISO 8044:2020].

Az ISO 15156-1:2020 az SSCC-t SSC-ként jelöli, és megjegyzi, hogy az SSC és a GHSC a HSC egyik formája.

galvanikusan előidézett hidrogénes feszültségi megrepedés = Repedés, amely egy galvánpár katódján fejlődő hidrogén, valamint (maradó és/vagy alkalmazott) húzófeszültség jelenlétében alakul ki egy fémekben [*galvanically induced hydrogen stress cracking, GHSC*; ISO 15156-1:2020].

hidrogén által előidézett feszültségi korróziós megrepedés = A környezeti hidrogénes elridegedés kategóriája, amikor üzemelés közben következik be a törékenyenit a korróziós folyamatban képződött hidrogén és a terhelés okozta húzófeszültség együttes hatására végbe menő repedési folyamat révén [*hydrogen induced stress corrosion cracking*; ISO 1891-2:2014].

Ezt a károsodásfajtát egyes szakmai dokumentumokban így jelölik: HISCC. Az ISO-szabványok közül csak az ISO/TR 20491:2019-ben szerepel. ekként: hidrogén által segített feszültségi korróziós megrepedés (HaSCC) vagy hidrogén által előidézett feszültségi korróziós megrepedés (HiSCC).

hidrogén által előidézett feszültségi megrepedés = Repedési jelenség a terhelés és a hidrogénes elridegedés kombinációja miatt, amely utóbbit a katódos polarizáció következtében az acél felületénél képződött hidrogén behatolása okoz [*hydrogen-induced stress cracking, HISC*; ISO 15589-2:2012].

feszültség által orientált, hidrogén által előidézett repedés; feszültségi belső szétválás = Szakaszos, kis repedések, amelyek nagyjából merőlegesek a (maradó vagy alkalmazott) főfeszültségre, és amelyek egy „létraszerű” repedéstömböt képeznek, ami összeköti a (néha kicsi) már meglévő HIC-repedéseket.

A megrepedés módja az SSC kategóriájába sorolható; a külső igénybevétel és a hidrogén által előidézett repedések közüli helyi alakváltozás kombinációja okozza. A SOHIC kapcsolódik az SSC-hez és a HIC/SWC-hez. Megfigyelték a hosszvarratos csövek alapanyagában és a nyomástartó edények varratainak hőhatásövezetében.

A SOHIC viszonylag ritka jelenség, amelyet általában a kis szilárdságú, ferrites szövetszerkezetű csőacélokhöz és nyomástartó edény-acélokhöz társítanak [*stress-oriented hydrogen-induced cracking, SOHIC; ISO 15156-1:2020(en), décohésion interne sous contrainte ISO 15156-1:2020(fr)*].

hidrogén által segített megrepedés = Ez a kifejezés nem része a szabványok definiált szakkifejezéseinek, de több fejezetben is szerepel, és ott a hidrogén által előidézett megrepedéssel (HIC) azonosnak jelölik [*hydrogen assisted cracking, HAC; ISO 11114-4:2017, ISO/TR 20491:2019*].

hidrogén által fokozott helyi képlékenység = Ez a kifejezés nem része a szabványok definiált szakkifejezéseinek, de több fejezetben is szerepel [*hydrogen enhanced local plasticity, HELP; ISO/TR 20491:2019*]. Definíciója tehát nincsen de értelmezésének lényege az, hogy a diszlokációk mobilitása és képződési energiája csökken a nagy hidrogéntartalmú területeken (pl. bemeteszések, repedéscsúcsok). A képlékenység kellő növekedése ezért ezekre a zónákra összpontosul, ami kedvez a csúszásnak, a korlátozott képlékenység kialakulásának s végül a helyileg képlékeny törésnek.

2.3 Az ASTM F2078-15-ben felsorolt, további, lényeges szakkifejezések

hidrogén gáz okozta elridegedés = Az EHE elkülönült formája, amelyet a nagynyomású hidrogén gáz külső forrásai okoznak; a repedések a külső felületen kezdődnek [*gaseous hydrogen embrittlement, GHE*].

hidrogén által segített feszültségi megrepedés = Repedésterjedés a hidrogén jelenléte következtében, amely folyamat lehet akár IHE, akár EHE, és néha hidrogénes feszültségi megrepedésnek (HSC) is nevezik [*hydrogen-assisted stress cracking, HASC*].

reakciós hidrogénes elridegedés = Visszafordíthatatlan elridegedés, amelyet a hidrogén és a fém stabil hidridet képező reakciója okoz [*reaction hydrogen embrittlement, RHE*].

hidrogénes elridegedésre való érzékenység = Anyagtulajdonság, amelyet a feszültségintenzitási tényező küszöbértékével mérnek a hidrogén által kiváltott feszültségi repedésre; K_{Isc} , K_{IHE} vagy K_{EHE} . A keménység és a mikroszerkezet függvénye [*susceptibility to hydrogen embrittlement*].

2.4 A korróziós károsodásoknak és vizsgálatoknak a témába vágó szakkifejezései

hólyagosodás = Folyamat, amely a tárgy felületén látható, kidudorodó kupola alakú hibaként jelentkezik, és amely a felszín alatt lokalizált dekohézióból ered.

Bevonatmentes fémnél a hólyagosodást a túlzott belső hidrogénnyomás okozhatja [*blistering; ISO 8044:2020*].

lépcsős megrepedés = Olyan megrepedés, amely összeköti a fém szomszédos síkjain a hidrogén által előidézett repedéseket (HIC).

A kifejezés a repedés megjelenését írja le. A lépcsős repedést előidéző, belső szétválások összekötődése a

repedések közötti helyi alakváltozásnak és a környező acélanyag oldott hidrogén általi elridegedésének a függvénye. A HIC/SWC jelenléte általában a csövek és nyomástartó edények gyártásához használt, kis szilárdságú, lapos acéltermékeknek jellemző [*stepwise cracking, SWC; ISO 8044:2020*].

feszültségi korrózió = A fém korrózióját és alakváltozását együttesen magába foglaló folyamat az alkalmazott vagy a maradófeszültség hatására [*stress corrosion; ISO 8044:2020*].

A szabvány 2003-as, magyar nyelvű szövegében: „Feszültséggkorrózió = A fém maradó vagy terhelő feszültsége és a korrózió együttes folyamata”.

feszültségi korróziós megrepedés = Repedési jelenség a feszültségi korrózió miatt [*stress corrosion cracking; ISO 8044:2020*].

A szabvány 2003-as, magyar nyelvű szövegében: „Feszültséggkorróziós törés = A feszültségi korrózió következtében létrejött törés”.

ridegítő hatású gázok = Olyan gázok, amelyek a fém repedését okozhatják a feszültség és a hidrogénatomok együttes behatása következtében [*embrittling gases; ISO 11114-4:2017*].

mozgásra képes hidrogénatomok = Hidrogénatomok a kristályrács rácspontközi helyein és a reverzibilis csapdahelyeken [*mobile hydrogen atoms; ISO 17081:2014*].

hidrogénátáramlás = A fém próbatesten áthaladó hidrogén mennyisége területegységenként és időegységenként [*hydrogen flux; ISO 17081:2014*].

2.5 A hidrogén okozta károsodásokhoz kapcsolódó hőkezelések alapvető szakkifejezései

hidrogéneltávolító izzítás = izzítás az A1 hőmérséklet alatt, a hőtartási idő a munkadarab méretétől és a hidrogéntartalomtól függ. Az edzett vagy betétben edzett acéloknál a hidrogént rendszerint 230 és 300 °C közötti hőmérsékleten, néhány órás izzítással távolítják el [*hydrogen removal annealing; ISO 4885:2018*].

hidrogénes elridegedéstől mentesítő hőkezelés = Hőkezelési folyamat, amelyet olyan hőmérséklet-tartományban és annyi ideig végeznek, hogy az alapanyag szövetszerkezete ne módosuljon, pl. ne újrakristályosodjon, de amelynél a bevonatolt alkatrészek elridegedéstől való mentesítése – vagyis az atomos hidrogén elnyelése következtében bekövetkező elridegedésre való érzékenység csökkenése – megvalósítható [*hydrogen-embrittlement-relief heat treatment; ISO 2080:2008*].

kiizzítás = Hőkezelés, amely lehetővé teszi a vasalapú termékben elnyelt hidrogéntől való megszabadulást anélkül, hogy a termék anyagának szerkezete módosulna. Ezt a hőkezelést általában galvanizálást, pácolást vagy hegesztést követően végzik [*baking; ISO 4885:2018(en), déshydrogénation; ISO 4885:2018(fr)*].

kiegétés = A hegesztőanyagok hevítése a varratfém diffúzióképes hidrogéntartalma egy meghatározott szintjének elérése érdekében. A kiegészítést általában a hozaganyag gyártója végzi [*baking; MSZ ISO/TR 25901-1:2020*].

3. Összefoglalás

A hidrogén okozta anyagkárosodások témaköre csak egy szűk területe a mérnöki munkának, de bizonyára kivüláglik a 2. fejezetben összefoglalt szakkifejezésekből, hogy annak, aki erre a területre téved, nem árt visszatérni az alapokhoz, és úgy folytatni a munkát.

Az elmúlt évtizedekben Magyarországon a hidrogén okozta károsodásokkal már viszonylag sokat foglalkoztak azok a szakemberek, akik az érintett iparágak anyagkárosodási és hegeszthetőségi problémáival szembesültek. Érthető módon csak kevesen publikálták az e téren szerzett tapasztalataikat, de az ő közleményeik különösen hasznosak. A közleményeik pontos adatait a Magyar folyóiratok tartalomjegyzékeinek kereshető adatbázisában (MATARKA) [21] meg lehet találni, itt csak a nevüket soroljuk fel [22]-[30]: Berényi László, Rothstädter Endre és Bozsóné Kaptay Veronika, Bacskai Antal, Rácz Zoltán és Dolinka Tamás, Michal Kubica, Kovács Mihály, Szentiványi Ede, Fehérvári Gábor.

Irodalomjegyzék

- [1] ISO 2394:2015 General principles on reliability for structures
- [2] ISO 8930:2021 General principles on reliability for structures — Vocabulary
- [3] ISO 13823:2008 General principles on the design of structures for durability
- [4] MSZ EN 10229:1999 Az acél hidrogén okozta repedéssel szembeni ellenálló képességének vizsgálata (angol nyelvű)
- [5] ISO 5127:2017 Information and documentation — Foundation and vocabulary
- [6] MSZ EN ISO 6892-1:2020 Fémek. Szakítóvizsgálat. 1. rész: Vizsgálat szobahőmérsékleten (ISO 6892-1:2016)
- [7] ISO 14623:2003 Space systems - Pressure vessels and pressurized structures — Design and operation
- [8] ISO 20064:2019 Metallic materials — Steel — Method of test for the determination of brittle crack arrest toughness, Kca
- [9] ISO 4885:2018 Ferrous materials — Heat treatments — Vocabulary
- [10] ISO/TR 20491:2019 Fasteners — Fundamentals of hydrogen embrittlement in steel fasteners
- [11] ISO 8044:2020 Corrosion of metals and alloys — Vocabulary
- [12] ISO/TR 15916:2015 Basic considerations for the safety of hydrogen systems
- [13] ISO 1891-2:2014 Fasteners — Terminology — Part 2: Vocabulary and definitions for coatings
- [14] ISO 15156-1:2020 Petroleum and natural gas industries —

Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production — Part 1: General principles for selection of cracking-resistant materials

- [15] ISO 15589-2:2012 Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Cathodic protection of pipeline transportation systems — Part 2: Offshore pipelines
- [16] ISO 11114-4:2017 Transportable gas cylinders — Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents — Part 4: Test methods for selecting steels resistant to hydrogen embrittlement
- [17] ASTM F2078-15 Standard Terminology Relating to Hydrogen Embrittlement Testing
- [18] ISO 17081:2014 Method of measurement of hydrogen permeation and determination of hydrogen uptake and transport in metals by an electrochemical technique
- [19] ISO 2080:2008 Metallic and other inorganic coatings — Surface treatment, metallic and other inorganic coatings — Vocabulary
- [20] MSZ ISO/TR 25901-1:2020
- [21] Magyar folyóiratok tartalomjegyzékeinek kereshető adatbázisa <https://matarka.hu/> (letöltés dátuma: 2022.05.12.)
- [22] Berényi László A hidrogénes elridegedés, Gépgyártástechnológia, 1975. (15. évf.) 12. sz. pp. 558.
- [23] Rothstädter Endre, Bozsóné Kaptay Veronika: Inhibitorok hidrogénridegédést gátló hatásának és habzókéességének vizsgálata, Korroziós figyelő: korrozióvédelmi műszaki tudományos folyóirat, 1979 (19.évf.) 1. sz., pp. 11-14.
- [24] Bacskai Antal: Az acélok nagy hőmérsékleti hidrogénes károsodásának diagnosztikája Korroziós figyelő: korrozióvédelmi műszaki tudományos folyóirat, 2008 (48.évf.) 5. sz., pp. 115-119.
- [25] Bacskai Antal: Az ausztenites acélok hidrogén okozta károsodása, Korroziós figyelő: korrozióvédelmi műszaki tudományos folyóirat, 2011 (51.évf.) 6. sz., pp. 141-143.
- [26] Bacskai Antal, Rácz Zoltán, Dolinka Tamás: A hidrogén okozta hólyagosodás, Korroziós figyelő: korrozióvédelmi műszaki tudományos folyóirat, 1988 (28.évf.) 3. sz., pp. 95-97.
- [27] Michal Kubica, Adamiec Piotr: A szimulált hőciklus hatása az x65 és x70 csőacélok hidrogén okozta repedésekkel szembeni érzékenységére, Gép, 2000. (51. évf.) 6. sz., pp.49-51.
- [28] Kovács Mihály: Áttekintés a hidrogén okozta repedésveszély elkerülésére alkalmazott módszerekről, Hegesztéstechnika, 2003. (14. évf.) 4. sz., pp. 24-27.
- [29] Szentiványi Ede De Wet, Hartmut: Hegesztési varratok hidrogén okozta törékenysége, Hegesztéstechnika, 2003. (14. évf.) 3. sz., pp. 50-52.
- [30] Fehérvári Gábor: Hidrogén által okozott repedések keletkezése különböző típusú acélok hegesztett kötéseiben, MAGÉSZ Acélszerkezetek, 2010. (7. évf.) 4. sz. pp. 54-60.

A hidrogén szerepe a földgázhálózatok tervezésében, üzemeltetésében és karbantartásában

Role of hydrogen addition on design, operation and maintenance of gas networks

Tóth László^a, Guy Pluvinaud^b, Capelle Julien^c

^aBay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., tudományos tanácsadó, laszlo.toth@bayzoltan.hu

^bLaboratoire de Fiabilité Mécanique, Université de Lorraine, Professor Emeritus, pluvinaud.guy@orange.fr

^cLaboratoire de Fiabilité Mécanique, Université de Lorraine, julien.capelle@anim.univ-lorraine.fr

Kulcsszavak

hidrogén elhidegedés,
gázvezetékek,
tervezés,
üzemeltetés,
felügyelet

Absztrakt

A hidrogénnel kevert földgáz a szállító vezetékek károsodását idézheti elő. Ennek mértékét azonban számos paraméter befolyásolhatja. Néhány ezek közül: a csővezeték anyaga, a szállított földgáz összetétele, a bekevert hidrogén mennyisége, a vezeték üzemi paraméterei és az üzemeltetési környezet, beleértve a vezetékek társadalmi és geográfiai sajátosságait. Ez utóbbiakat elsősorban a hálózat tervezése, és karbantartási stratégiájának kialakítása során kell figyelembe venni, az előbbieket pedig a már üzemelő gázhálózat alkalmazhatósága kapcsán kell mérlegelni. E témakör részletes vizsgálatára indította az európai szakmai közösség a 2004. január 5-én 39 partnerrel, 11 MEuro támogatással, 17.3 MEuro befektetéssel az FP6 keretprogramban a „NATURALHY” projektet.

Keywords

hydrogen embrittlement,
gas pipelines,
design,
surveillances,
maintenance

Abstract

Hydrogen when is blended with natural gas over time different kinds of degradations may cause in the pipeline materials. The level of these possible degradation processes is influenced by many parameters. Some of them relate to the following: pipeline materials, composition of the natural gas, blended ratio of hydrogen, operating parameters of the pipelines, environmental parameters of the pipeline, including both geographical and social issues as well. The last-mentioned issue basically needs to be considered in design periods and formulation of the maintenance strategy that type of gas networks which is going to be used for transport of hydrogen blended natural gas. The European technical society has launched a large common research project for explore the necessary knowledge in the mentioned fields within the 6FP under the title of "NATURALHY" with 39 EU partners with 11 MEuro EC-grant and 17.3 MEuro support in 05.01.2004.

1. Bevezetés

Az emberi élet fenntarthatóságát bolygónkon a következő három tényező határozza meg: **ÉTEL (ITAL) – ANYAG – ENERGIA**. Ha ezek bármelyike is hiányzik, az emberi élet nem tartható fenn. Az „ételre” vonatkozóan azt mondhatjuk, hogy a termelési technológiák fejlődésével nagy valószínűséggel biztosítható az alapvetően szükséges mennyiségű és minőségű táplálék az emberiség számára még hosszú ideig akkor is, ha a népszaporulat a jelenlegi szinten is marad. Az „**ivóvíz**” kérdésével azonban már most is küzd az emberiség. Vannak olyan felmérések, amelyek szerint az emberiség mintegy 10%-a [1] nem jut megbízható minőségű ivóvízhez! Az „**anyag**” tekintetében nyugodtan használhatjuk a „volt-van-lesz” szókapcsolatot. Az ok egyszerű. Az ember, mint a legfejlettebb élőlény attribútuma, azt az anyagot használja mindennapjaiban, amelyet **ismer**, és amelyet **gazdaságosan kitermelhet, feldolgozhat** létének adott technikai szintjén. Az ismeretek pedig folyamatosan bővülnek, az eszközök egyre szofisztikáltabbak, így az emberiségnek korlátokkal nem kell számolnia. Komoly gondot jelent már a közeljövőben is az „**energia**”. A fosszilis alapenergia-hordozók közül az olajkincs 40-50 év múlva kimerül, a gáz mintegy 3-4-szer hosszabb ideig áll rendelkezésre. Egyedül a föld szénkészlete biztosítható most belátható ideig. Gondjaink forrása az, hogy az első gőzturbinát az 1800-as évek végén, az 1900-as évek elején állították üzembe [2], azaz a villamosenergia, mint könnyen konvertálható energiaforrás előállítására előbb szenet, majd olajat és az 1950-es évektől gázt égettek el, azaz olyan alapenergia-forrásokat használtak, amelyeket a természet évezredek alatt hoz létre! Az emberiség mindezt 1-2 évszázad alatt elfogyasztja! Következésképpen az „**energia**” az emberiség létének alapkérdése és nem zszurnalisztikai probléma! A fosszilis

energiahordozók korlátozottak, következésképpen megnyugtató jövőkép csak a megújuló forrásokkal biztosítható. Ezek a következők:

- nukleáris vagy fúziós,
- hidrogén,
- geotermikus energia,
- bármilyen mozgási energia (levegő, víz) felhasználása, átalakítása,
- sugárzási energia (nap) felhasználása, átalakítása.

A felsorolt alapenergia – források közül a nukleáris energia a „politika – legkézenfekvőbb játékszere” (van, volt és lesz is). Ennek hangoztatására pedig nem a „szakmai tudásra”, hanem a „beszédkészségre” van csupán szüksége az emberiségnek. A „mozgási energiákhoz (víz, szél, ozmózis)”, a geotermikus adottságok és a (nap)sugárzás-hoz kötődő források kihasználását a földrajzi környezet eleve szabályozza, így a hidrogén szerepe folyamatosan növekszik. E tény kézenfekvően tükröződik abban is, hogy hidrogénnel üzemelő járművek sokasága található azon országokban, amelyek kellő időben álltak a „megújuló energiaforrások hasznosítása” rajtvonalánál. Az is tényként kezelhető, hogy a Nap szolgáltatja energiamennyiségéből csupán néhány nap alatt megkapja az emberiség az egész éves szükségletét. Igaz, ehhez a tárolás és szállítás kérdése még a sürgősen megoldandó problémák halmazában szerepel annak ellenére, hogy már napjainkban is számos kecsegtető megoldási lehetőségeket tárt fel a fizika tudománya különösen a szállításhoz kötődően [3].

2. A hidrogén gazdaság sajátosságai

A fenti alcímet „hidrogén gazdaság”, avagy „hidrogéngazdaság” kifejezésként is lehetett volna írni, azt hangsúlyozva, hogy a hidrogén alapenergia-forrás, azaz minden más típusú energia igény kielégítése ezen

anyagból származik, méghozzá a hidrogén átalakításával, elégetésével [4]. Hogy miért is indokolt a hidrogénre, mint alapenergia-forrásra gondolni, azt számos előnye indokolja. Ezek közül kiemelendők a következők:

- Égése során keletkező nagy mennyiségű energia keletkezik. A különböző energia-forrásokban rejlő lehetőségek számszerűleg is összehasonlíthatók a fűtőértékek (MJ/kg) alapján is [5]. A hozzávetőleges értékek szárított fa 15, kőszén 30, földgáz 40, propán 46, metán 50, hidrogén 120.
- Bőségesen rendelkezésre áll földünkön.
- Égése szénmentes, következésképpen nincs hatása klímánk változására.
- Tárolható, szállítása a jelenleg alkalmazott technológiákkal megoldható.
- Közvetlen energiaforrása lehet a közlekedési eszközöknek.
- A különböző lokális megújuló energiaforrások felhasználhatók hidrogén előállítására.

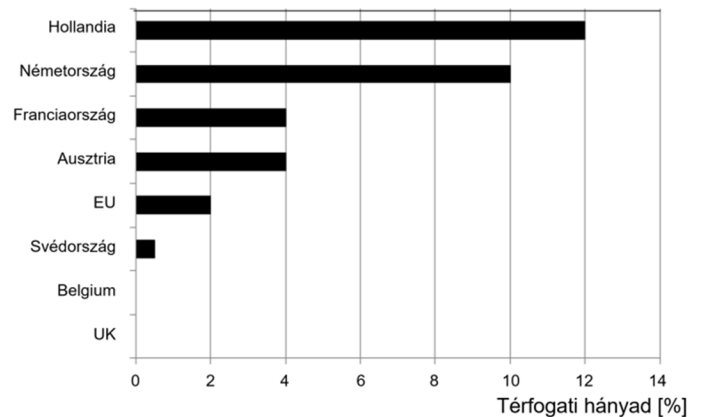
Mint minden energiaforrásnak, a hidrogénnek is számos hátránya is jelentkezik. Ezek közül napjaink technológiai színvonalát tekintve a következők emelhetők ki:

- Tárolásának költségintéje magas mind a folyadék, mind pedig fémhidrid formában a nagy energiaigény miatt.
- Szállítása kevésbé költséghatékony, mint az olaj vagy földgáz nagy távolságra történő elszállítása.
- Előállítási, gyártási folyamata meglehetősen költségigényes.
- Levegővel érintkezve robbanás- és gyulladásveszélyes.

Azt azonban tényként kell kezelniük az energiaszektorral foglalkozó szakembereknek, hogy csak folyamatos átmenetekkel lehet felhagyni a fosszilis energiaforrások felhasználásával. Az okok nagyon is kézenfekvők:

- Meglevő szállítási infrastruktúrák (csővezetékek, tömítések, feldolgozási technológiák stb.)
- Meglevő felhasználói berendezések (bojlerek, tűzhelyek, kazánok stb.)
- Meglevő tervezési, működési és szabályozási rendszerek mind az irányítástechnika, mind pedig a hatósági eljárásrend tekintetében.

A fentiek mindegyike olyan, hogy egyik pillanatról a másikra „csettintéssel” nem változtatható meg. Éppen ezért indult újtára az a gondolkör, hogy a meglévő földgázvezetéseket használják fel különböző mennyiségű, arányú hidrogén bekeverésével. Ezen gondolkör indította el a NaturalHy-projektet 2004. május 1-gyel 5 éves útjára a norvég Gasunie Engineering & Technology vezetésével 39 partner részvételével a 6. Keretprogramban [6]. A közlemény szerzői direkt vagy indirekt módon (korábbi vendégprofesszori meghívással) az ENIM (Ecole Nationale d'ingénieur de Metz) vettek részt a programban. A projekt általános bemutatása, a partnerek szerepe, tevékenysége több anyagban megtalálható, pl. [7], de az egyik legfontosabb eleme „*milyen lehet a legmagasabb részarány*” máig is nyitott kérdés és részleteiben is elemzik a szakemberek szerte a világban [8].



1. ábra: A földgázba keverhető maximális mennyiségű hidrogén térfogathányada. (az ábra kiegészíthető Svájc 4%-os, és Anglia 0%-os értékeivel) [14]

3. A hidrogén lehetséges részaránya meglévő gázvezetékben

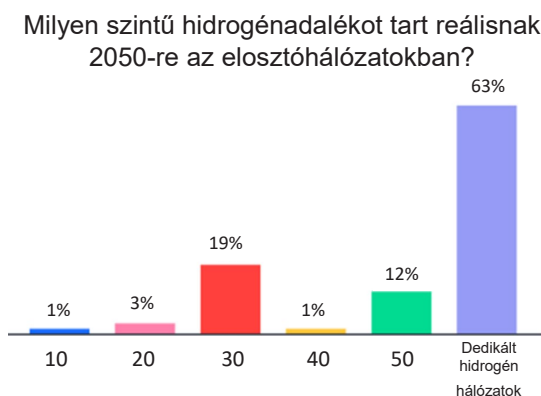
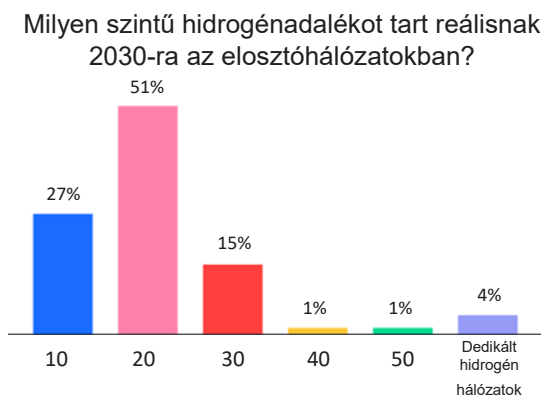
Természetes igényként jelenhet meg a szakemberek körében, hogy a meglévő és kellően definiált gázvezeték-hálózatokat [9] használhassák fel a hidrogén szállítására is. Ezen igény azonban biztosan nem elégíthető ki maradéktalanul, mert a különböző gázvezetékek:

- anyagának minősége és gyártási technológiájuk eltérők;
- geometriai jellemzőik (átmérő, falvastagság) számottevően különböznek;
- üzemi paramétereik (nyomás, földrajzi környezet) jelentősen különböznek;
- a szállított gáz összetétele nem azonos;
- építésének időpontjaiban alkalmazott szerelési és hegesztési technológiájuk nem azonos.

Csupán a kiragadott felsorolások alapján is törvényszerű, hogy a különböző országok eltérő térfogathányadú hidrogén bekeverését tartják biztonságosnak. A jelenlegi helyzetet szemlélteti az 1. ábra.

Azt azonban nyomatékosan hangsúlyozni kell, hogy az Európában indított NaturalHy-projekt eredményeinek összefoglalása, szintetizálása is megszületett az USA-ban is 2020-ban [10]. Közben Európában tovább „izzott a NaturalHy-projekt parazsa” számos újabb projektet, közleményt és elgondolást generálva [11]-[14]. Jelen közleménynek nem célja a futó és különböző forrásokból támogatott projektek céljainak, eddig elért eredményeinek összefoglalása, a partnerek bemutatása. Ennek ellenére egyetlen projektet és annak egyetlen részeredményét szeretnénk kiemelni. A ThyGA projekt keretében az első Workshop mintegy 100 résztvevőjét megkérdezték, hogy milyen részarányt prognosztizál a gáz elosztóhálózatban 2030-ban és 2050-ben. A válaszok megoszlását szemlélteti a 2. ábra

A 2. ábra mindenképpen elgondolkodtató a jövő tekintetében. Egyik oldalról azt tükrözheti, hogy 2030 körül a meglévő elosztó vezetékek 93%-ában 10-30% hidrogéntartalmú földgáz szolgáltatása várható és mindössze 4%-ot képvisel az új, kizárólagosan hidrogén szállítására épített vezetékek. A másik értelmezése az, hogy az évszázad közepén a kifejezetten hidrogén szállítására épített új vezetékek részaránya már 63% lesz, míg a most meglévő vezetékek mintegy ötödében 30%, ill. tizedében 50%



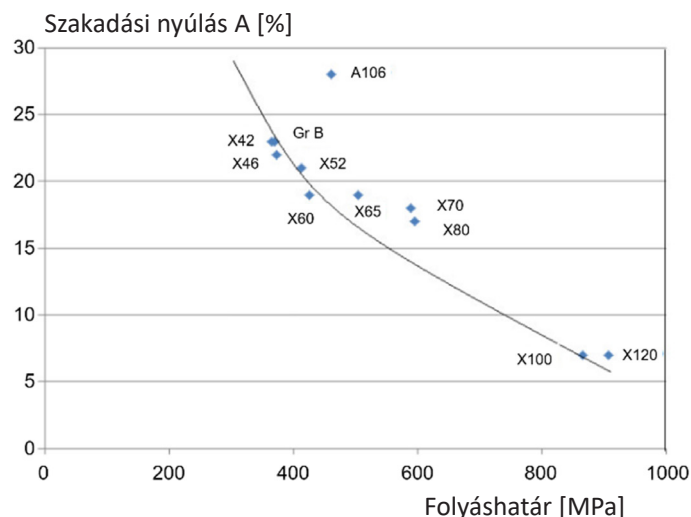
2. ábra: A 2030-ra és 2050-re prognosztizált hidrogénkoncentráció a földgáz elosztóhálózatában a THyGA projekt első Workshopjának (2020.06.05) résztvevői szerint [11]

hidrogéntartalmú földgáz szolgáltatása várható. A jelenlegi ismereteink szerint e prognózisnak lehet esetlegesen műszaki háttere (az üzemelő vezetékek anyagának és hidrogén kölcsönhatásának), de ugyanígy a vezetéképítőkkor lobby érdeke is.

4. A hidrogén és a csővezeték anyagának kölcsönhatása és ennek következményei

A hidrogén szerepét az acél tulajdonságainak megváltozása kapcsán már a XIX. század végén megfigyelték. Jelen közleményben nem kívánunk a részletekkel foglalkozni, hiszen mindezt megtettük egy korábbi közleményben [14], amelyben bőséges irodalmi hivatkozások segíti az elsődleges eligazodást azok számára, akik bővebb és részletesebb tájékozódásra tartanak igényt. A már említett ThyGA projekt keretében is részletes áttekintés készült a hidrogén okozta elridegedés témaköréből, annak mechanizmusairól, valamint a folyamatot befolyásoló anyagi tulajdonságokról, terhelési feltételekről és hidrogénnel való feltöltődést befolyásoló egyéb körülményekről [15]. Az anyagok tekintetében a szénacélok, ausztenites acélok, a réz és ötvözetek, alumíniumötvözetek és a szerelvények csapok, szelepek (fittingek) hidrogénes elridegedésének hajlamát jellemző adatok kerültek feldolgozásra [15]. Az irodalmi adatok alapján azonban egyértelmű, hogy a **hidrogén hatást gyakorol** a csövek anyagainak

- képlékenységre (kontrakciójára vagy szakadási nyúlására), ami az alakváltozásra történő méretezés szempontjából lehet fontos;



3. ábra: A különböző szilárdságú csőanyagok szakadási nyúlása folyási határuk függvényében [14], [16]

- törési szívósságára;
- átmeneti hőmérsékletére;
- ismétlődő terhelésnél a töréshez tartozó ciklusok számára;
- a fáradásos repedés terjedésével szembeni ellenállására;
- az anyagtulajdonságok szórását növeli, éppen a hidrogén okozta lokális hatások miatt.

Az is majdnem egyértelműnek tűnik, hogy a hidrogén **nem gyakorol számottevő hatást** a csőanyagok szilárdsági jellemzőire (folyási határára és szakító szilárdságára).

A következő részben az előzők BIZONYÍTÁSÁRA bemutatásra kerül néhány olyan példa, amelyek az egyértelmű megállapításokat alátámasztják. Ezzel kapcsolatban azonban hangsúlyozni kell, hogy a bemutatott példák

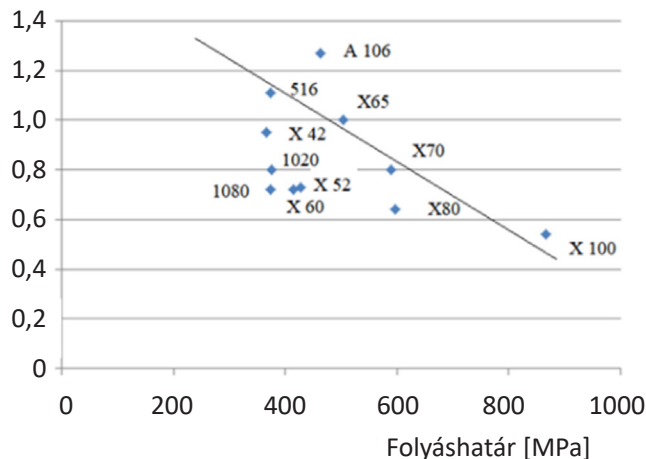
- számszerű adatai hazánkban nem alkalmazhatók, mert:
- a vezetéképítésben alkalmazott hazai acélok még kémiai összetételének megfelelése esetén is eltérő kohászati és kikészítési technológiával készülhetnek, ill. az
- olyan vizsgálati körülmények alapján készültek, amelyekre nézve nem állnak rendelkezésünkre megbízható információk.

A 3. ábra szemlélteti a különböző folyási határú csőanyagok szakadási nyúlását.

A 3. ábrával kapcsolatban a következő megjegyzések tehetők:

- természetes az, hogy a szilárdság növekedésével a szakadási nyúlás csökken, azaz a csővezeték anyaga egyre ridegebbé válik és a hidrogén jelenléte a ridegséget csak tovább növeli, ill. a lokális bemetszések, feszültséggyűjtő helyek (hibák) hatása egyre veszélyesebb;
- arra nézve nincsenek adatok, hogy a szakadási nyúlás vagy, következésképpen a hazai csőanyagok beilleszthetősége jogos kérdéseket vethet fel abból eredően, hogy $A_5 > A_{10}$.

a H₂-ben és levegőben mért szakadási nyúlások hányadosai



4. ábra: A különböző szilárdságú csőanyagok hidrogén közegben és levegőben mért szakadási nyúlásainak hányadosa a folyási határjuk függvényében [16]

A 3. ábrán szemléltetett eredményeknél többet mutat a 4. ábra, ahol ugyanezen acéltípusokra a H₂-ben és levegőben mért szakadási nyúlások hányadosai láthatók az anyagok folyási határának függvényében.

A 4. ábra kapcsán is kiemelhetők ugyanazon megjegyzések, amelyeket már a 3. ábránál jeleztünk, de ez még kiegészíthető a H₂-közegre jellemző paraméterek hiányával!

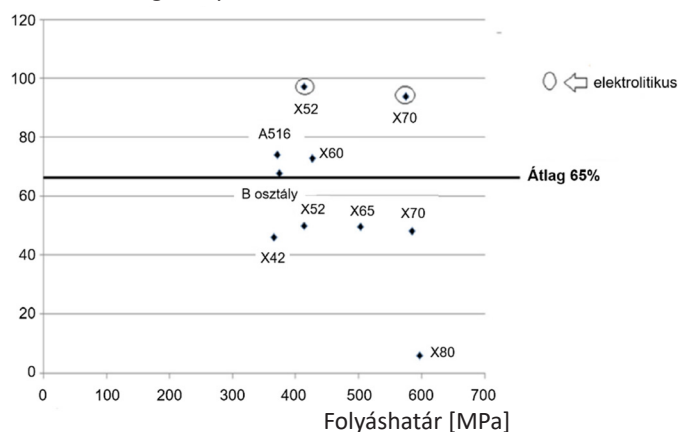
Azt evidenciának kell tekinteni, hogy a csőanyagok repedésterjedéssel szembeni ellenállását (K_{Ic} vagy J_{Ic} értékét) a H₂ jelenléte radikálisan csökkenti. Ezt meggyőzően támasztja alá az 5. ábra.

Ha az 5. ábrán érzékeltetett csökkenés hatását kívánjuk érzékeltetni, akkor tekintsük a „törésmechanika alapképletét”, amely az alábbi formában teremt kapcsolatot a terhelő feszültség (σ), az a hosszúságú repedés és a repedés-csúcsban ébredő feszültségintenzitási tényező K_I között.

$$K_I = f(\text{geometria}) \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

A fenti kifejezésből következik, hogy adott terhelés (σ) és geometria mellett a repedés akkor terjed, ha a K_I

Törési szívósság aránya HE-sel és anélkül



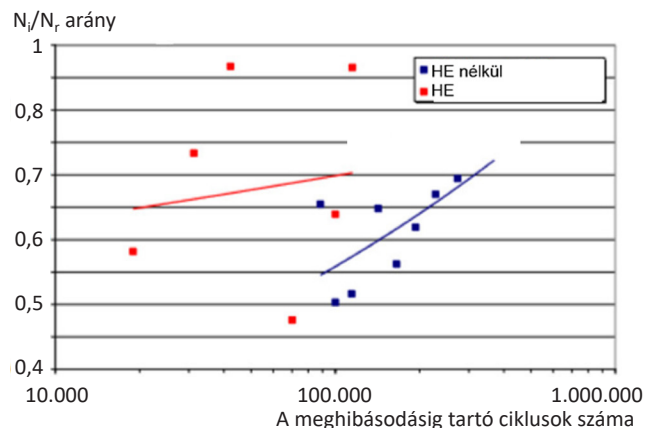
5. ábra: A H₂ közegben és levegőben mért törési szívósság aránya a folyási határ függvényében [14]

eléri a K_{Ic} , a törési szívósság értékét. Ha a H₂ hatására a törési szívósság $1/0,65=1,54$ -edszer csökken, akkor a kritikus repedéshossz ennek négyzetével, azaz $2,37$ -szer lesz kisebb!! Még kézenfekvőbben megfogalmazva, ha a szívósság (a repedés terjedésével szembeni ellenállást tükröző anyagjellemző) felére csökken, akkor már az $1/4$ hosszúságú repedés terjedőképes lesz! A gondolatmenetet folytatva azt mondhatjuk a H₂ ridegítő hatása miatt az egyre kisebb méretű „repedésszerű” hibák is törési veszélyt hordozzák magukban! Ugyanezt mondhatjuk az éles bemetszésű karcokra vagy korróziós nyomokra is. E tényeket pedig messzemenően figyelembe kell venni mind a karbantartás, mind pedig a periodikus felülvizsgálatok tervezésénél és az észlelt hibák értékelésénél is.

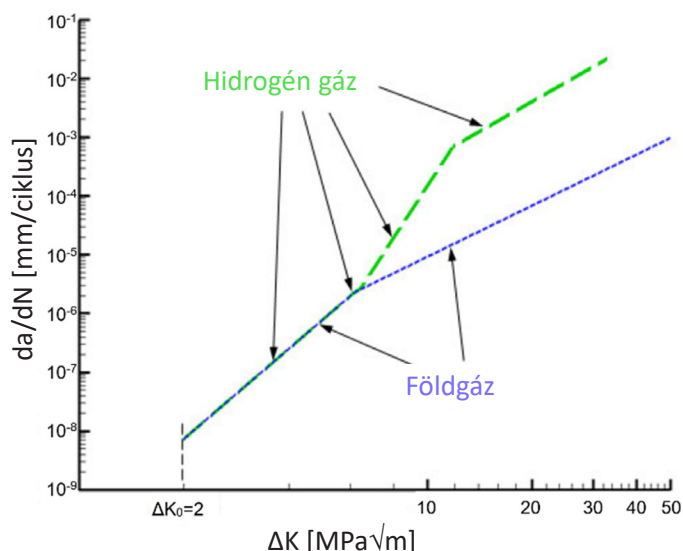
A hidrogén hatása jelentkezik a csőanyagok kifáradási tulajdonságainak változásában is. Noha nem jelenthető ki egyértelműen, hogy vizsgálati eredmények tucatjai állnak a szakemberek rendelkezésére, mégis található néhány elgondolkodtató eredmény. A 6. ábra a fáradásos repedés keletkezéséhez (Ni) és a teljes töréshez (Nr) tartozó igénybevételi szám arányát szemlélteti levegőben és hidrogénben.

A 6. ábrán feltüntetett eredményekkel kapcsolatban a következő megjegyzések tehetők:

- A hidrogén hatására rendkívül erősen növekszik a vizsgálati eredmények szórása, azaz a fáradásos károsodás lokális jellege erőteljesen jelentkezik.
- Kisebbségi terheléseknél (amikor a töréshez tartozó igénybevételi szám nagy), akkor az Ni/Nr értéke közelíti az 1-et, azaz a hidrogénes közegben nehezen keletkezik repedés, de ha egyszer megjelent, nagyon gyorsan terjed. De ennek fordítottja is előfordulhat (lásd a legfelső és legalsó piros színű pontokat), következésképpen az előző francia bekezdés teljes mértékben igazoltnak tekinthető.
- A hazánkban felhasznált csőanyagok viselkedésére nézve egyrészt nincs semmilyen tapasztalat, másrészt nem áll rendelkezésre olyan mennyiségű és minőségű információ a vizsgálatok körülményeiről, amely lehetővé tenné a hazai acélminőségek várható viselkedésének becslését ismétlődő terhelés esetén. A hidrogén közegben és földgázban végzett



6. ábra: A fáradásos repedés keletkezéséhez és a teljes töréshez tartozó igénybevételi szám aránya a törési ciklusszám függvényében API 5L X52-es acélnál [14]



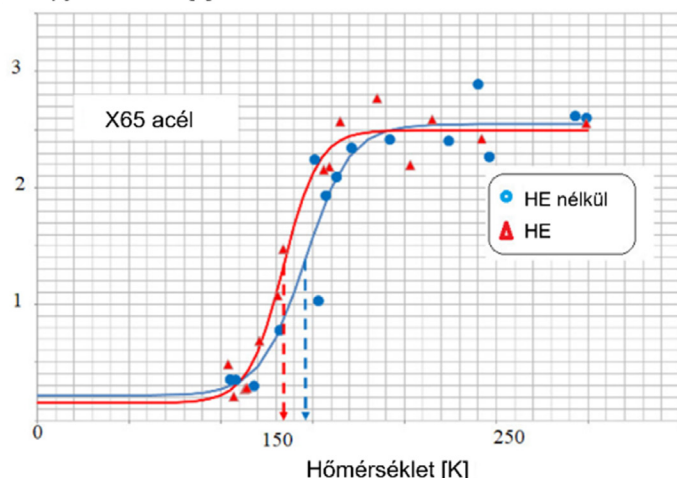
7. ábra: A fáradásos repedésterjedés jellege hidrogén és földgáz közegben [14]

fáradásos repedésterjedés vizsgálatok eredményei (7. ábra) jellegében alátámasztják a 6. ábrán látható szórást.

A 7. ábra ugyanis eklatánsan azt szemlélteti, hogy a viszonylag kisméretű repedések ($\Delta K \leq 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) földgázban és hidrogén közegben egyformán terjednek, de egy bizonyos méretet elérve a hidrogén ridegítő hatása jelentős szerephez jut és a repedésterjedés felgyorsul.

Tekintettel arra, hogy a csővezetékek zöme ferrites szénacél és a térközepes köbös rácsú fémek ridegedésre hajlamosak, elvileg felmerülhet a ridegtörés lehetősége is. A ridegedési hajlamot általában a különböző hőmérsékleteken elvégzett Charpy-féle ütővizsgálat eredményei alapján kijelölt átmeneti hőmérséklettel jellemzik. Amennyiben földgázhoz hidrogént is adagolnak, döntő kérdés ennek ridegítő hatása, azaz a csővezeték anyagának hogyan változik az átmeneti hőmérséklete. Erre nézve szemléltet eredményeket a 8. ábra X65 minőségű csőanyagra.

Charpy ütőmunka [J]



8. ábra: X65 minőségű csőanyag Charpy-próbatesteken különböző hőmérsékleteken mért ütőmunkája hidrogénben kezelve és anélkül [14]

Az ábrát szemlélve a következő megállapításokat tehetjük:

- A hidrogénben való kezelés nem tekinthető ridegítő hatásúnak (sőt némileg még csökkenti is azt, hiszen az átmeneti hőmérséklet még csökken is), hiszen az átmeneti hőmérséklet nem emelkedik.
- A ütőmunka értékek legnagyobb és legkisebb értékeit a hidrogénben történő kezelés nem módosítja. Ez összhangban van azokkal a tapasztalatokkal, hogy a hidrogén nem módosítja számottevő mértékben a csőanyagok szilárdsági jellemzőit.
- Az ábra függőleges tengelyén szereplő ütőmunka-értékek szokatlanul kicsik. Ennek oka az, hogy a vizsgálatokat ún. „mini-próbatesteken” végezték. A nukleáris iparban a neutronbesugárzás hatására bekövetkező elridegedési folyamat monitorozására már kiterjedten alkalmazott mini-próbatestek széleskörben teret hódítottak, így célszerű lenne ennek értelemszerű áttemelése a csőanyagok különböző közegekben bekövetkező öregedési folyamatainak elemzésére.
- A hazánkban felhasznált csőanyagok viselkedésére nézve egyrészt nincs semmilyen tapasztalat, másrészt nem áll rendelkezésre olyan mennyiségű és minőségű információ a vizsgálatok körülményeiről, amely lehetővé tenné a hazai acélminőségek várható viselkedésének becslését.

A hazai energetikai rendszer jövőjét tekintve [17] úgy tűnik, hogy a „zöld-hidrogén termelés” (megújuló energiaforrásokkal előállított) meghonosítása irányában célszerű elgondolkozni, és e területhez kötődő fejlesztések gazdasági feltételeinek elemzésében kell elmélyedni a közeljövőben. Az így előállított hidrogén szállítása, tárolása a meglévő földgázhálózatba történő bekeveréssel gazdaságosan megvalósítható. Azt azonban nem szabad elfeledni, hogy a hidrogéntartalmú földgáz a szállítóvezeték és az elégetésre használt égőfejek anyagára hatást gyakorol. A különböző hatások mechanizmusainak megismerése, számszerű jellemzésére kiterjedt és elméletileg is megalapozott, összehangolt anyagvizsgálatokra van szükség. A szükséges ismeretek egyrészt a világszerte e témakörben futó projektek eredményeinek szintetizálásával, a hazai tapasztalatok és részeredmények [18] ellenőrzésével, felhasználásával, másrészt olyan anyagvizsgálati centrum (csoport) létrehozásával valósítható meg, amely hosszú távon felvállalja e témakör nemzetközi szintű gondozását.

5. Összefoglalás

A közlemény célkitűzését és az áttekintett irodalmi adatokat tekintve az alábbi megállapítások tehetők

1. A fosszilis energiaforrások korlátozott volta, a periodikus árobbanása, az erőteljes politikai energiafüggetlenség, a jövő generációinak „karbonsemlegessége” miatt hazánkban is indokolt a megújuló energiaforrások egyre nagyobb részarányának elérése.
2. A kimeríthetetlen szolár-energiaforrás gazdaságos szállítási és tárolási technológiai jelenlegi ismereteink szintjén nem megoldottak, így alapenergia forrásnak még nem tekinthető.

3. Jelenleg világszerte a **hidrogén** részarányának növelésére törekcszenek az alapenergiaforrás biztosításában oly módon, hogy annak termelésére megújuló energiaforrásokat használnak fel.
 4. Az így előállított ún. „**zöld-hidrogén**” szállítása, tárolása elvileg megoldható a földgázhoz keverve.
 5. A kizárólagosan földgázra tervezett jelenlegi szállító és tároló rendszerek biztonságos üzemeltethetősége a hidrogén adagolás miatt azonban számos megválaszolendő műszaki problémát vet fel.
 6. Hidrogénnel kevert földgáz és a szerkezeti anyagok kölcsönhatásának lehetséges következményeit irodalmi adatok alapján áttekintve egyrészt az mondható, hogy világszerte erősen kutatott terület, amely nemzetközi forrásokkal is támogatott, másrészt eddigi eredményei kecsesgetők, noha időnként ellentmondások.
 7. Magyarországon is szükséges a szakemberek olyan csoportjának kialakítása, amely nemzetközi téren is értékelhető szakmai kompetenciát képvisel.
 8. Tekintettel arra, hogy a hazai gázvezetékek zömének üzemeltetési ideje meghaladja a 40 évet és a csövek eltérő kohászati technológiákkal készülhettek, célszerű a csőanyagok egy reprezentatív adatbázisát összeállítani a vegyi összetétel és mechanikai tulajdonságai tekintetében. Ennek alapján pedig reprezentatív vizsgálatokkal ellenőrizni, hogy a hazai csőanyagok milyen mértékben kompatibilisek a nemzetközi szakirodalomban közölt vizsgálati megállapításokkal a hidrogén várható hatását tekintve.
- [6] Florisson, O., Huizing R.R.: The safe use of the existing natural gas system for hydrogen (Overview of the NATURALHY-project). Lásd: Naturalhy_Partnerek_WP-k.pdf <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/downloads/naturalhy-project-overview> (Letöltve: 2022.06.05.)
 - [7] Naturalhy_Brochure.pdf <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/downloads/naturalhy-project-overview> (Letöltve: 2022.06.05.)
 - [8] Ronevich J., Marchi S.: Hydrogen Blending into Natural Gas. Study Group on Materials Testing and Qualification for Hydrogen service. 2019. July 19.
 - [9] List_of_natural_gas_pipelines.pdf https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_natural_gas_pipelines (Letöltve: 2022.06.16.)
 - [10] Melaina M.W., Antonia O., Penev M.: Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks. A Review of Key Issues. California Energy Commission. 2020. Oct. 1.
 - [11] Testing Hydrogen admixture for Gas Applications. THyGA-projekt honlapja: <https://thyga-project.eu/> (Megtekintés dátuma: 2022.06.05.)
 - [12] Alltfield K., Pinchbeck D.: Adminissible hydrogen concentratorations in natural gas systems. Gas for Energy. 2013/3. www.gas-for-energy.com
 - [13] Putting Science into Standards: Power-to-Hydrogen and HCNG. ERATO, the European Standards Organisations and European Commission's Joint Research Centre. JRC Petten, 21-22 October, 2014
 - [14] Pluvinage G., Tóth L., Capelle J.: Effects of Hydrogen Addition on Design, Maintenance and Surveillance of Gas Networks. Processes 2021, 9 p. 1-25. <https://doi.org/10.3390/pr9071219>
 - [15] THyGA: Deliverable D2.4: Non-combustion related impact of hydrogen admixture – material compatibility: <https://thyga-project.eu/deliverable-d2-4-non-combustion-related-impact-of-hydrogen-admixture-material-compatibility/> (Letöltve: 2022.06.16.)
 - [16] G. Pluvinage: Mechanical properties of a wide range of pipe steels under influence of pure hydrogen or hydrogen blended with natural gas. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 190. 2021. 104293 <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104293>
 - [17] Tanulmányok a magyarországi energetikáról. Magyar Tudományos Akadémia. Budapest, 2008. ISBN 978-963-508-573-6.
 - [18] Magyar Földgáztároló Zrt. honlapja: 2021. február 1-jén elstartolt a Magyar Földgáztároló Zrt. Akvamarin projektje: <https://mfgt.hu/hu-HU/Akvamarin> (Letöltés: 2022.06.17.)

Irodalomjegyzék

- [1] Worldometers honlapja: <https://www.worldometers.info/hu/> (Megtekintés dátuma: 2022.06.18.)
- [2] Termuehle H.: 100 years of power plant developmet. ASME Press, New York, 2001.
- [3] R.B. Service: After decades, room temperature superconductivity achieved. Science. 14. oct. 2020. <https://doi.org/10.1126/science.abf2621>
- [4] Oláh Gy., Goeppert A., Prakash G. K. S.: Kőolaj és földgáz után: A metanolgazdaság. Better Kiadó, Budapest, 2007.
- [5] Wikipédia: A szabad enciklopédia: Fűtőérték: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Fűtőérték> (Letöltve 2022.06.05.)

A hidrogén tárolásának és szállításának lehetőségei

The possibilities of hydrogen storage and transportation

Varbai Balázs^a, Katula Levente^b, Dobránszky János^c

^aBME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, adjunktus, varbai.balazs@gpk.bme.hu

^bBME Anyagtudomány és Technológia Tanszék, egyetemi docens, katula.levente@gpk.bme.hu

^cEötvös Loránd Kutatói Hálózat, MTA-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport; BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék tudományos tanácsadó, Dobranszky.Janos@eik.bme.hu

Kulcsszavak

hidrogén,
nyomástartó-edény,
elhidegedés,
alternatív energia,
karbonsemlegesség

Absztrakt

A hidrogén tárolása iránti igény egyre növekszik. Ennek elsődleges oka, hogy a hidrogén mint alternatív energiahordozó, jelentős szerepet játszik a szén-dioxid-kibocsátás-csökkentési törekvésekben. A hagyományos akkumulátorok ugyan képesek hatékonyan tárolni a villamos energiát, nagy mennyiségű energia hosszú távú tárolására mégsem gazdaságosak. A hidrogén, mivel az egyik legolcsóbb villamosenergia-tárolási lehetőség hosszú időtartamra is, a megújuló energiák tárolásának egyik legkedvezőbb alternatívája. Cikkünkben először áttekintjük a hidrogén tárolásának módszereit, majd részletesen bemutatjuk a különböző hidrogéntartályok típusait, ezek költségvonzatait, és a közötti szállításuk módszereit.

Keywords

hydrogen,
pressure vessel,
embrittlement,
alternative energy,
carbon neutrality

Abstract

The demand for hydrogen storage is growing. The primary reason for this is that hydrogen, as an alternative energy source, plays a significant role in efforts to reduce CO₂ emissions. Although conventional batteries can store electricity efficiently, they are not economical for long-term storage of large amounts of energy. Hydrogen, as one of the cheapest long-term electricity storage options, is one of the best alternatives for storing renewable energy. In our paper, we first review the methods of storing hydrogen, then we present in detail the different types of hydrogen tanks, their cost implications, and the methods of transporting them by road.

1. Bevezetés

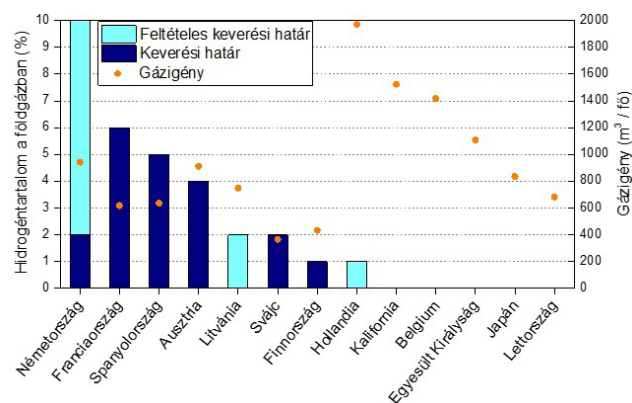
A hidrogén tárolása iránti igény egyre növekszik. Ennek elsődleges oka, hogy a hidrogén mint alternatív energiahordozó, jelentős szerepet játszik a szén-dioxid-kibocsátás-csökkentési törekvésekben a közúti és a tengeri közlekedésben felhasználható üzemanyagként. Ezen kívül a hidrogén hosszú távon rugalmas energiatárolási lehetőségeként tekinthető. A hidrogént jelenleg az ipari, a közlekedési és az energiatermelési ágazatokban használják; a felhasználása azonban főleg az ipari szektorra koncentrálódik (pl. olajfinomítás). Várható, hogy a hidrogén iránti kereslet 5,48%-os összetett éves növekedési ütemben növekszik a 2019 és 2025 közötti időszakban [1], míg, mint energiahordozó anyag globális piaca 5,8%-kal bővül ugyanebben az időszakban.

A hidrogén potenciális energiahordozó, mivel az egyik legolcsóbb villamosenergia-tárolási lehetőség hosszú időtartamra is, ami a megújuló energiák között az egyik legkedvezőbb alternatívává teszi [2]. Ezenkívül a megújuló energiákból származó energia hidrogénnel és hidrogénalapú tüzelőanyagokkal nagy távolságokon keresztül továbbítható. Az elektrolízis során keletkező hidrogén szintén kulcsfontosságú szerepet játszhat a megújuló villamos energia feleslegének nagy mennyiségben történő felhasználásában [3].

A hidrogén mint energiahordozó a lakossági és ipari felhasználásban várhatóan jelentős szerepet fog kapni a jövőben. Ennek a fejlődésnek egy első lépcsője a hidrogénnek kis mennyiségben földgázhoz való keverése. A hidrogén minél nagyobb százalékos arányú felhasználása nem csak kisebb CO₂-kibocsátást eredményez, de egyben elősegítené a különböző hidrogéntermelési módszerek fejlesztését, és ezáltal az előállítási költség mérséklését. A kis CO₂-kibocsátású hidrogén előállítási költsége jelenleg 11,4-14,2 \$/MJ (12-15 \$/MBtu), ami jóval nagyobb, mint a földgázból 1 MJ előállításához szükséges 2,8-9,5 \$ [4].

A földgázhoz való hidrogén-hozzákeverés felső határát a földgázellátás nemzeti specifikációja, az esetleges anyagminőségi korlátozások és a hálózat legérzékenyebb berendezéseinek tűréshatára szabja meg. Emiatt a legnagyobb megengedhető hidrogéntartalom a földgázban általában legfeljebb 2,5%. Az 1. ábra [5] a hidrogén földgázhoz történő legnagyobb, megengedett keverési határértékét mutatja néhány országban, az éves, egy főre eső gázigény (m³/fő) feltüntetésével.

Az 1. ábrából látható, hogy feltételek nélkül, a teljes gázellátói hálózatot tekintve, jelenleg Franciaországban a legnagyobb a földgázban megengedett hidrogéntartalom, ami 6%. Németországban a lokális gázelosztó hálózat által megszabott feltételekkel a hozzákevert hidrogén a 10%-ot is elérheti. Azokban az országokban, ahol az egy főre jutó éves gázigény messze a legnagyobb (pl. Kalifornia állam, USA) a földgázhoz történő hidrogénkeverés jelenleg nem engedélyezett. A nagyobb gázfelhasználók várhatóan engedélyezni fogják a hidrogén földgázhoz történő, kisebb százaléku keverését a jövőben, ami szintén elősegíti a hidrogén előállításának, tárolásának, szállításának további fejlesztését és a költségek mérséklését.



1. ábra: A hidrogén földgázhoz történő keverésének megengedett határértéke néhány országban az éves, egy főre eső gázigény feltüntetésével [5]

2. A hidrogén tárolásának módszerei

A hidrogén tiszta, molekuláris formában történő tárolása gáz- vagy folyadékfázisban lehetséges. Jelenleg az ipar nagy méreteken ezt a két tárolási módszert alkalmazza.

2.1 A sűrített hidrogéngáz tárolása

Mivel a tárolási nyomás korlátozott, az elérhető hidrogéntárolási sűrűségek is korlátozottak: 100 bar és 20 °C hőmérsékleten a hidrogéngáz sűrűsége körülbelül 7,8 kg/m³. Ezen a nyomáson és hőmérsékleten a hidrogén kompresszibilitási tényezője 1,0613 [6]. A relatív kis tárolási sűrítés nagy tárolási térfogatokhoz és ezáltal nagy beruházási költségekhez vezet. A kisebb tárolási nyomás azonban egyszerűbb tömítőrendszereket és így kisebb üzemeltetési költségeket igényel [7], [8].

A nagyobb nyomásokon (700 bar) alkalmazott tartályok korszerű, kompozit anyagok felhasználásával készülnek, beruházási költségük nagy, ezért föld feletti, telepített (stacionárius) tárolási megoldásokra kevésbé alkalmazot- tak [9]. A kompozittartályok hátránya még, hogy minden esetben legalább 10 bar nyomást fenn kell tartani bennük, azaz például atmoszférikus nyomáson nem szállíthatók. A hidrogén sűrített gázként történő palackos tárolásával kapcsolatban széles ipari tapasztalat van, azonban a 200 bar nyomás feletti tárolás a beruházási költségek és a biz- tonsági kérdések miatt számos akadályt jelent.

2.2 A cseppfolyós hidrogén tárolása

A nyomásfokozás mellett a tiszta hidrogén sűrűsége cseppfolyósítással (kondenzációval) is növelhető. A cseppfolyósításnak az az előnye, hogy nagyon nagy hidrogéntárolási sűrűség érhető el már légköri nyomáson: a telített cseppfolyós hidrogén sűrűsége 1 bar nyomáson 70 kg/m³ [10].

A cseppfolyós hidrogén tárolásának elsődleges problé- mája az energiaigényes cseppfolyósítási folyamat. Két fő oka van annak, hogy a hidrogén cseppfolyósítása miért igényel jelentős energiabevitelt: a hidrogén rendkívül kis forráspontja (-253 °C 1 bar nyomáson) és az a tény, hogy a hidrogéngáz nem hűl le a fojtási folyamatok során (adiaba- tikus, izentalpikus folyamat) -73 °C körüli hőmérsékletnél kisebb hőmérsékletre [11]. Ez utóbbi probléma előhűtést tesz szükségessé a cseppfolyósítási folyamatban, legy- gyakrabban a cseppfolyós nitrogén bepárlásával [12]. Ennek ellenére a hidrogén-cseppfolyósító üzemekre több ipari példa is létezik: a globális kiépített hidrogén-csepp- folyósítási kapacitás körülbelül 355 tonna/nap, a jelenleg működő legnagyobb üzem kapacitása 34 tonna/nap [13].

A környezettől a tárolt cseppfolyós hidrogénig terjedő hőátadás, és ezáltal a párolgási sebesség csökkenthető azáltal, hogy minimalizálják a tartályok felület-térfogat arányát (gömbtartályok alkalmazásával), és fejlett szige- teléstechnikával minimalizálják a tartály falain keresztüli hőátadást [11]. A cseppfolyós hidrogént tároló kriogén edények (ADR-szerinti mélyhűtő tartály) általában kettős falúak, a falak között nagyvákuumot alkalmaznak.

3. A hidrogéntartályok típusai

Ötféle, különböző típusú nyomástartó edény létezik gáz- nemű hidrogén tárolására. A nyomástartomány jellemzően 200 bar és 700 bar között van [14]. A mobil tárolóeszközö- ket a 39/2021. (VII. 30.) ITM rendelet a Veszélyes Áruk Nemzetközi Közúti Szállításáról szóló Megállapodás (ADR) [15] alapján tartánynak nevezzük. A különböző tartálytípusokat a műszaki tartalomnak való megfelelés szerint alkalmazzák. A legolcsóbb az 1. típus kivitel, míg a legdrágább, a legújabb fejlesztésű 4. típusú nyomástartó edény.

1. típusú kivitel (MSZ EN ISO 11439:2013 [16] szerint)

A nagy nyomások és az ebből adódóan fellépő feszült- ségeloszlás és gyártási folyamat miatt az összes, sorozat- ban gyártott hidrogéntároló nyomástartó edény hengeres alakú. A nyomástartó edény egy fém (általában acél) falból áll. Az ilyen típusú tartályok névleges nyomása jellemzően a 200 bar-os tartományban van, és széles körben hasz- nálják őket a gáziparban mind szállítótartályként, mind helyhez kötött nyomástartó edényként.

2. típusú kivitel

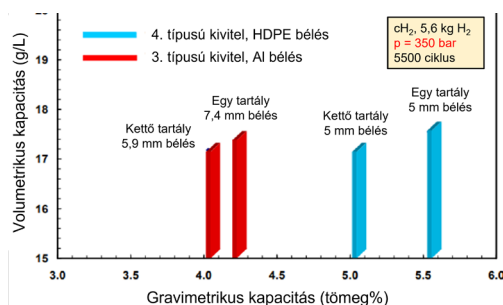
A 2. típusú nyomástartó edények a fémköpenyre felvitt, műgyantába ágyazott üvegszál vagy szénszál erősítésű köpenyből állnak. A 2. típusú nyomástartó edény esetében a kompozitköpeny csak az edény hengeres részét veszi körül. Ez egyrészt kismértékű súlyelőnyt eredményez a választható kisebb falvastagságok miatt, másrészt akár 1000 bar nyomástartományig teherbíró. A 2. típusú nyo- mástartó edényeket főleg helyhez kötött alkalmazások- ban, például hidrogén-töltőállomások tárolótartályaiban használják.

3. típusú kivitel

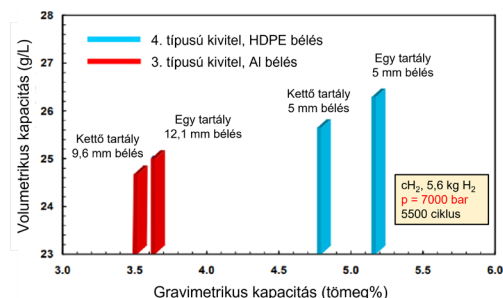
A 3. típusú palackoknak van egy bélése, amely fémből, főleg alumíniumból készül, és jellemzően szénszál erő- sítésű kompozitköpennyel körülvett a palack hengeres része. A szénszál kompozitburkolat viseli a terhelés nagy részét. Ezt a típust nagy gravimetrikus energiatartal- ma különbözteti meg az 1. és 2. típustól. Főleg mobil alkal- mazásokhoz használják, például üzemanyagcellás jármű- vekben. A mobil alkalmazások tipikus nyomása 350 bar vagy 700 bar. Lehet helyhez kötött alkalmazásokhoz is használni, de figyelembe kell venni az 1. és 2. típushoz képest nagyobb anyagköltségeket.

4. típusú kivitel

A 4. típusú nyomástartó edény a legújabb fejlesztésű tárolótartály, amely jelenleg sorozatgyártásban van. A bélés műanyagból, jellemzően poliamidból vagy polietilén- ből készül kompozitburkolattal, melynek erősítőszálai álta- lában szénszálak. Ez a kialakítás további nyomáselőnyt biztosít a nyomástartó edénynek a három előző típusokkal szemben. A 4. típusú nyomástartó edényeket szállítási és mobil alkalmazásokban is használják.



2. ábra: 350 bar-os, 3. és 4. típusú tartályok gravimetrikus- és a volumetrikus kapacitásainak összehasonlítása [18]



3. ábra: 700 bar-os, 3. és 4. típusú tartályok gravimetrikus- és a volumetrikus kapacitásainak összehasonlítása [18]

5. típusú kivitel

Ez a típus még nem került sorozatgyártásba. Ennek a nyomástartó edénynek nincs bélése, a teljes szerkezet kompozitból készül (MSZ EN ISO 24431:2017 [17] szerint).

A 2. és 3. ábrák a 3. és 4. típusú tartályok gravimetrikus és a volumetrikus kapacitásait hasonlítják össze. A 2. ábrán a 350 bar nyomású hidrogéntároló nyomástartó edények, a 3. ábrán pedig a 700 bar nyomásúakat látjuk. Látható, hogy a két, 350 bar nyomású kialakítás között a 4. típusnak jobb a gravimetrikus kapacitása. Ugyanakkor a 3. típus ára kedvezőbb. A 700 bar-os nyomástartományban már mind a gravimetrikus, mind a volumetrikus kapacitása kedvezőbb a 4. típusú tartálynak.

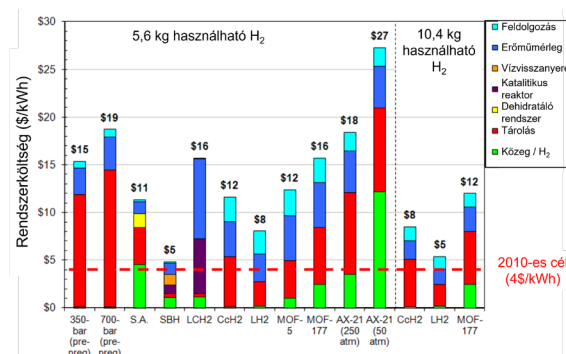
4. A különböző tartálytípusok költségei

4.1 Az Egyesült Államok Energiügyi Minisztériumának (United States Department of Energy) költségbecslési projektje

Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériumának megbízásából készített projekt célja a hidrogéntároló rendszer költségeinek becslése volt nagy volumenű termelést feltételezve. A minisztérium tárolási rendszer költségcélja 2010-ben 4 \$/kWh volt [19].

A jelentés a fedélzeti (járművön történő) hidrogéntárolás négy kategóriájára vonatkozóan adja meg a költségek és a teljesítmény rendszerszintű értékelését: (1) reverzibilis fém-hidridek (például magnézium-hidrid, nátrium-alanát); (2) regenerálható kémiai hidrogén-tároló anyagok (például nátrium-bór-hidrid, ammónia-borán hidrolízise); (3) nagy felületű adszorbensek (például szénalapú anyagok); és 4) fejlett fizikai tárolás (pl. 700 bar sűrített, kriosűrített és cseppfolyós hidrogén). Ezenkívül értékeli a jelentés a helyhez kötött hidrogéntároló rendszerek hatékonyságát és költségeit: (1) cseppfolyós tárolótartályt, (2) nátrium-bór-hidridet, (3) ammónia-boránt és (4) magnézium-hidridet.

A jelentés „alulról felfelé építkező” költségcsökkentési módszertan szerint került összeállításra, amely a hidrogéntároló rendszerek gyártása során alkalmazott folyamatok elemzésére és számszerűsítésére szolgál. Ez a módszertan, amelyet a DFMA® (Boothroyd-Dewhurst Design for Manufacturing & Assembly) szoftverrel és más eszközökkel együtt használnak, figyelembe vette a tartály összes fő alkatrészének költségeit, a kiegyenlítőtartályt, a tartály összeállításának és a rendszer összeszerelésének



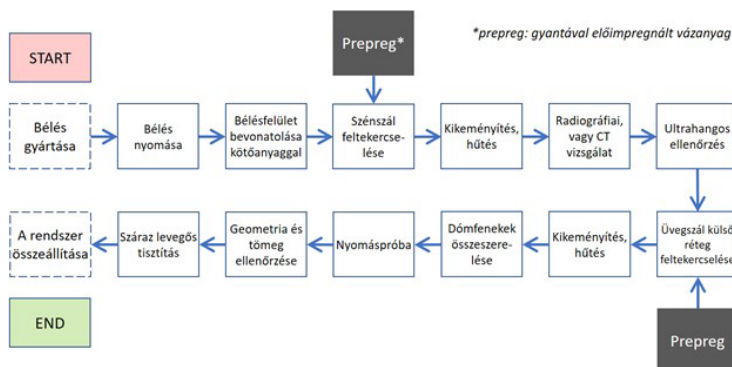
4. ábra: A fedélzeti hidrogéntároló rendszer költségeinek összefoglalása [19]. A jelölések és mozaikszók jelentése: pre-preg = gyantával előimpregnált vázanyag, S.A. = sodium alanate (nátrium-alanát), SBH = sodium borohydride (nátrium-borohidrid), LCH2 = liquid hydrogen carrier (cseppfolyós hidrogén), CcH2 = cryo-compressed hydrogen (mélyhűtött, sűrített hidrogén), LH2 = liquid hydrogen (cseppfolyós hidrogén), MOF = metal-organic framework (fém-szerves vázrendszer), AX-21 = activated carbon hydrogen storage (aktív szén hidrogéntárolás)

költségeit. E módszertan alapján a 4. ábra az elemzett, különböző fedélzeti hidrogéntároló rendszerek nagy volumenű gyártásának költségeit mutatja be.

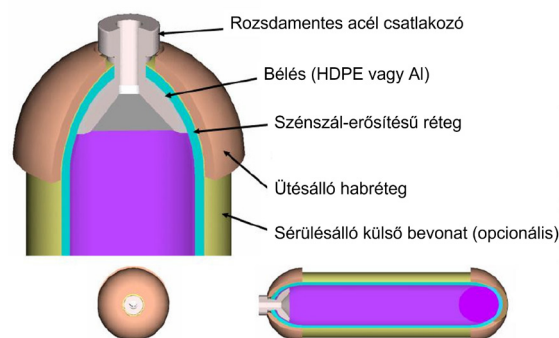
Általában a tartályköltségek jelentik a rendszerköltség legnagyobb elemét, amelyek a teljes rendszerköltség legalább 30 %-át teszik ki, két rendszer kivételével. Az ún. BOP-költségek – a BOP az angol „balance of plant” mozaikszava, magyarul: üzemgyensúlyi komponensek – a rendszerköltségeket is megemelik, ami a különböző tárolási rendszerek összes rendszerköltségének 10-50 %-át teszik ki. Ezen komponensek a biztonsági berendezések, szabályozók, elektronikus vezérlők, érzékelők, az összes fedélzeti kezelőberendezés, amely a H2 tárolásához szükséges (pl. szűrők), valamint a szerelési hardverek és gázvezetékek a tárolórendszer alkatrészeinek csatlakoztatásához. A szén-szál erősítésű tartály gyártási folyamatábrája az 5. ábrán látható.

4.2 A szén-szál ára

A szén-szál költségei jelentősen befolyásolják a nagy-nomomású hidrogéntároló rendszerek gyártási költségeit és kereskedelmi árait. A korábbi költségelemzésekkel való összehasonlíthatóság fenntartása érdekében a jelentésben a szén-szál alapára 29 USD/kg. A szén-szálat a repülőgépiparban és más iparágakban már nagy mennyiségben alkalmazzák, így várhatóan a közeljövőben nem lesz



5. ábra: A szénszál-as kompozitburkolattal erősített tartály gyártási folyamatábrája [19]



6. ábra: Egy sűrített hidrogén-tárolótartály vázlatos felépítése [19]

jelentősen olcsóbb [20]. A magyarországi szénszálgyártás a Zoltek Zrt-nél folyik.

A számítások azt feltételezik, hogy a hidrogéntároló rendszer gyártója előre impregnált szénszál-as kompozitot (prepreg-et) vásárol olyan áron, amely 1,27-szerese a nyers szénszál-as anyagnak (prepreg/szénszál ár aránya = 1,27) [21].

4.3 Az üzemgyensúlyi komponensek költségeinek előrejelzése

A BOP-költségeket Delphi-módszerrel becsülték meg. A Delphi-módszer alapján az előrejelzéseket az ipari szakértőket – beleértve a beszállítókat, a tartályfejlesztőket és a végfelhasználókat – megkérdezve alakították ki. A végfelhasználói vagy fejlesztői becslések optimisták vagy egyes esetekben pesszimisták, mivel nem veszik figyelembe az autóiipari gyártáshoz szükséges folyamatokat vagy technológiai változásokat. Az egyes komponensek észszerű alapeseti költségét az előrejelzések és a felülről lefelé és az alulról felfelé irányuló becslések eredményeinek megítélése alapján választjuk ki.

A hidrogéntároló rendszer „gyárköltsége” vagy „gyártási költsége” felvételekor vertikálisan integrált gyártási folyamatot feltételezték; vagyis az autóiipari OEM (OEM = original equipment manufacturer, eredeti berendezés gyártója) a tartály összes alkatrészét házon belül gyártja, így az egyes tartályalkatrészek esetében köztes ellátási lánc nem szerepel. A fő tartályköltségeket (bélés, kompozitborítás és tartályszerelés) alulról felfelé becsülték külső beszállító nélkül. A valóságban a gyártási folyamat horizontálisan és vertikálisan integrált kombináció lenne.

A számítási modell feltételezi, hogy az autóiipari OEM megvásárolja az összes BOP-alkatrészt vagy -alrendszert a beszállítóktól, és a teljes rendszert házon belül szereli össze, valamint hogy az összes fő BOP-alkatrész esetében a beszállítók egységesen 15 %-os felárat kapnak.

A költségek becsléséhez 500.000 darab/év fedélzeti, sűrített hidrogén-tárolótartály gyártását vették alapul.

A 3. és 4. típusú, sűrített hidrogén-tárolótartály egy belső bélésből áll, amelyre szénszál-as kompozitréteg van tekercselve, ezt egy védő üvegszál-as réteg és védőhab végzőrök zárják. A tartály vázlatos felépítését a 6. ábra szemlélteti.

Az 1. táblázat a sűrített hidrogén-tárolórendszerek 3. és 4. típusának a jelentésben vizsgált kialakítási és tervezési paramétereit foglalja össze.

1. táblázat: Sűrített hidrogén-tárolórendszer kialakítása és egyéb feltételezések [19]

Tervezési paraméter	Értéke alapesetben
Névleges nyomás	350 bar és 700 bar
Üzemanyagtartályok száma	1, 2
Tartály belső bélése	3. típus (alumínium)
4. típus (HDPE)	
Maximális/töltési nyomás	350 bar-os: 438 bar; 700 bar-os: 875 bar
Nyomás az „üres” tartályban	20 bar
Hasznos H ₂ tárolókapacitás	5,6 kg
Szénszál tömege	3. típusú, 1 tartály, 350 bar: 48,6 kg 3. típusú, 1 tartály, 700 bar: 65,0 kg 3. típusú, 2 tartály, 350 bar: 24,4 kg 3. típusú, 2 tartály, 700 bar: 28,3 kg 4. típusú, 1 tartály, 350 bar: 55,4 kg 4. típusú, 1 tartály, 700 bar: 68,7 kg 4. típusú, 2 tartály, 350 bar: 28,0 kg 4. típusú, 2 tartály, 700 bar: 34,8 kg
Tartály mérete (víztartalom)	350 bar: 258 L; 700 bar: 149 L
Biztonsági tényező	2,25
Hossz/átmérő arány	3
Szénszál típusa	Toray T700S
A kompozit szaktitószilárdsága	2550 MPa
Tartálybélés vastagsága	7,4 mm alumínium (3. típus)
5 mm HDPE (4. típus)	
Külső réteg	1 mm-es üvegszál
Tartály végzárás	10 mm hab

A 2. táblázat a vizsgált tárolórendszerek főbb BOP-összetevőinek költségeit, míg a 3. táblázat a feltételezett alapanyagköltségeket mutatja be.

2. táblázat: A sűrített hidrogén-tárolórendszer költségbeceklése a főbb BOP-összetevőkre [19]

Vásárolt alkatrész becsült költsége (egy egység)	350 bar	700 bar
Nyomásszabályozó	160 \$	200 \$
Mágnesszelep vezérlő	186 \$	233 \$
Töltőcsom/nyílás	50 \$	63 \$
Nyomásadó	30 \$	38 \$
Nyomásmérő	17 \$	17 \$
Fém fejcsonk és dugó (a tartályban)	15 \$	19 \$
Egyéb BOP-összetevők	58 \$	68 \$

5. A hidrogén közúti szállítása

5.1 A sűrített hidrogén szállítása félpótkocsival

Nyomás alatti tárolásról akkor beszélünk, amikor a gázt az atmoszférikus nyomásnál nagyobb nyomáson tároljuk. A nyomástartó edények szerkezete az alkalmazási terület és az ott szükséges nyomásszint függvényében különböző lehet. Helyhez kötött tartályok esetében a tartály geometriai kialakítása általában nem játszik meghatározó szerepet, ahogy a tartály tömege sem. Mobil felhasználásban, például gépjárművekben, a hely szűkösége és a tartály súlya már fontos szempont. Jelenleg a legtöbb olyan gyártó, amely hidrogénnel hajtott járművet fejleszt és gyárt, a 700 bar-os (70 MPa) nyomásszintet részesíti előnyben. Ennél a nyomásszintnél az üzemanyagcellás járművek hatótávolsága már elérheti a benzines járművek tartományát.

A modern nyomástartó edények összetett kivitelben, kompozitok felhasználásával készülnek: alumíniumból vagy polietilénből gyártott, vékony falú belső tartályok, amelyeket kívülről szén- vagy üvegszállal erősített kompozitburkolattal erősítenek meg. Ezek a szerkezetek sokkal könnyebbek, mint az acél alapanyagú, hagyományos nyomástartó edények. A hidrogén 1 köbméterének tömege kis sűrűségéből adódóan atmoszférikus nyomáson (1,013 bar) és 0 °C-on mindössze 0,0899 kg. Ha a hidrogént 200 bar-ra sűrítjük 0 °C-on, akkor a tömege köbméterenként 15,6 kg; míg 500 bar nyomáson 33 kg [22].

A félpótkocsi szállítás előnye, hogy a szállítmányt a rendeltetési helyén a félpótkocsi lekapcsolásával ott lehet hagyni, így a nyerges vontató más szállítási feladatba vonható. Félpótkocsi: olyan pótkocsi, amely a vontató nyergszerkezetére támaszkodik úgy, hogy súlyának jelentős részét a vontató veszi át.

Nyerges vontató: olyan vontató, amely a rajta levő nyergszerkezet útján a vontatott félpótkocsi súlyának jelentős részét átveszi [23].

5.2 Csőtartályos szállítás

Kis és közepes mennyiségű, gáz halmazállapotú hidrogén szállítható teherautóval, nyomástartó tartályokban. Nagyobb mennyiségek szállítása esetén több gázpalackot kötegelnek az angolul úgynevezett CGH2 (CGH2: compressed gaseous hydrogen) csőtartályos félpótkocsikon. A szállításhoz a nagyméretű hengeres palackokat (csőtartályokat) védőkeretben kötegekké egyesítik.

A csőtartályok hagyományosan acélból készülnek, és

3. táblázat: A sűrített hidrogéntároló rendszer feltételezett alapanyagköltségei [19]

Becsült alapanyagköltségek (2005), \$/kg	Alapeset
Hidrogén	3,0
HDPE belső burkolat	1,6
Alumínium (6061-T6)	9,6
Szénszál (T700S), prepreg	36,6
Üvegszál prepreg	4,7
Tartályvégzáró hab	6,4
Rozsdamentes acél (304, 316)	4,7
Szerkezeti acél	1,0



7. ábra: Csőtartályos félpótkocsi (tube trailer) sematikus kialakítása [24]

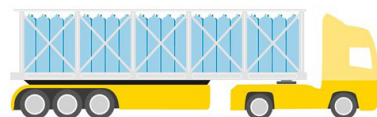
a tárolt gáz nyomásának növekedésével egyre nagyobb az ősúlyuk. Ebből adódhatnak szállítási korlátozások a nagy tengelyterhelés miatt. A legújabb hidrogéntároló nyomástartó edények könnyebb, kompoziterősítésű vagy kompozit anyagú tartályok (3. és 4. típus).

A 7. ábra egy csőtartályos tartálykocsi sematikus kialakítását ábrázolja.

A csőtartályos szállításban a csőtartályokat vízszintes helyzetben szállítják. A csőtartályok azonos geometriájúak (átmérő, hossz) és kialakításúak (anyag és nyomástartomány). A csőtartályok elhelyezésnek módja általában követi a két geometriai alapformát; a háromszög, illetve a négyszög elrendezést. Az első esetben a csőtartályokat úgy helyezik el, hogy azok befoglaló keresztmetszete egy egyenlő oldalú háromszög, a másik esetben négyszög legyen. A négyszög befoglaló keresztmetszetű elrendezés biztosítja az ürszelvény jobb kihasználtságát.

5.3 Palackköteges szállítás

A palackköteges szállításnál a kisméretű, jellemzően 60 literes, palackokat tizenkettes egységekben, állítva szállítják – ld. 8. ábra.



8. ábra: Palackköteges félpótkocsi sematikus kialakítása [24]

A palackkötegek befoglaló mérete ~1900×1000×770 mm (magasság × hosszúság × szélesség). Az acélpalackok töltőnyomása 200–300 bar, így 107–151 m³ sűrített gázt képesek tárolni. Egy palackköteg töltött tömege ~1320 kg, ha 200 bar a töltőnyomás és ~1460 kg, ha 300 bar a töltőnyomás [25], [26]. A sűrített hidrogén palackköteges szállítása a csőtartályossal szemben nagyobb rugalmasságot biztosít a gázt forgalmazónak az által, hogy a palackköteget göngyölegként a megrendelőnél lehet hagyni, ez által jelentősen csökkentve a „rakodási időt”.

5.4 A cseppfolyós hidrogén szállítása

Cseppfolyósított gázt tároló tartály(ny)okat nagy gáz-mennyiségeknél használnak. Mivel a hidrogénnél a kritikus pont felett (–240 °C és 1,3 MPa = 13,0 bar) nyomással történő cseppfolyósítás nem lehetséges, a cseppfolyósításhoz a hidrogént erősen le kell hűteni és összenyomni;



9. ábra: Cseppfolyós gázt szállító félpótkocsi sematikus kialakítása [24]

ekkor jön létre a cseppfolyós hidrogén, jelölése: LH₂.

Cseppfolyósított hidrogénnél a nyomás nem okoz problémát a tartály (a mobil tartályok ADR-es megnevezése szerint: tartány) kialakításakor, azonban meg kell oldani a tartály és a vezetékek hőszigetelését. Előnyös ugyanakkor, hogy a hidrogénnek kis hőmérsékleten erősen lecsökken a reakcióképessége, valamint a folyékony hidrogén 800-szor nagyobb sűrűségű a normál nyomáson lévő, gázemű hidrogénhez képest. Ennek ellenére a folyékony hidrogén sok helyet igényel, hiszen sűrűsége még így is csak 71 kg/m³, alig nagyobb, mint a kis pórusú polisztirolhabé.

A cseppfolyós hidrogén-szállítás hátránya, hogy a tartány belsejében lévő, nagyon kis hőmérséklet miatt még jó hőszigetelés mellett sem lehet elkerülni a környezetből származó hőáramlást, ami a hidrogén részleges elpárolgásához vezet. A belső térből, a nyomás növekedésének elkerülése érdekében, az elpárolgott hidrogént ki kell engedni.

A 9. ábra cseppfolyósított hidrogén szállítására alkalmas tartály és nyerges vontató sematikus kialakítását mutatja.

6. Összefoglalás

A hidrogénfelhasználási igény a közeljövőben várhatóan jelentősen növekedni fog az energiaiparban és a közlekedésben egyaránt. Cikkünkben röviden kívántuk bemutatni a hidrogéntárolás és szállítás lehetőségeit, különös tekintettel a sűrített hidrogéngáz nyomástartó-edényekben történő tárolására, szállítására, valamint az ezzel kapcsolatos költségekre vonatkozóan.

Irodalomjegyzék

- [1] INDUSTRYARC (2019) Hydrogen market share, size and industry growth analysis 2019 - 2025. In: Capacit. Manag Rev 201956405. <https://www.industryarc.com/Research/Hydrogen-Market-Research-501664> (letöltés dátuma: 2022.05.29.)
- [2] IEA (2019) The Future of Hydrogen. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (letöltés dátuma: 2021.08.20.)
- [3] Robinus M, Linßen J, Grube T, et al (2018) Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles
- [4] IEA (2019) Special Focus on Gas Infrastructure. <https://www.iea.org/articles/special-focus-on-gas-infrastructure> (letöltés dátuma: 2022.05.18.)
- [5] IEA (2020) Current limits on hydrogen blending in natural gas networks and gas demand per capita in selected locations. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/current-limits-on-hydrogen-blending-in-natural-gas-networks-and-gas-demand-per-capita-in-selected-locations> (letöltés dátuma: 2022.05.18.)
- [6] Messer A gázokról általában <https://www.messer.hu/1.-a-gazokrol-altalaban> (letöltés dátuma: 2022.05.18.)
- [7] Witkowski A, Rusin A, Majkut M, Stolecka K (2017) Comprehensive analysis of hydrogen compression and pipeline transportation from thermodynamics and safety aspects. Energy 141:2508–2518. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.141>
- [8] Hua TQ, Ahluwalia RK (2011) Alane hydrogen storage for automotive fuel cells – Off-board regeneration processes and efficiencies. Int J Hydrogen Energy 36:15259–15265. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.08.081>
- [9] O'Malley K, Ordaz G, Adams J, et al (2015) Applied hydrogen storage research and development: A perspective from the U.S. Department of Energy. J Alloys Compd 645:S419–S422. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.090>
- [10] Godula-Jopek A, Jehle W, Wellnitz J (2012) Storage of Pure Hydrogen in Different States. In: Hydrogen Storage Technologies. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, pp 97–170.
- [11] Andersson J, Grönkvist S (2019) Large-scale storage of hydrogen. Int J Hydrogen Energy 44:11901–11919. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>
- [12] Valenti G (2016) Hydrogen liquefaction and liquid hydrogen storage. In: Compendium of Hydrogen Energy. Elsevier, pp 27–51
- [13] Krasae-in S, Stang JH, Neksa P (2010) Development of large-scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009. Int J Hydrogen Energy 35:4524–4533. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.109>
- [14] Rosen A (2020) Wasserstoffdruckbehälter: Welche Druckbehälter-Typen gibt es? In: EMCEL. <https://emcel.com/de/wasserstoffdruckbehaelter/> (letöltés dátuma: 2021.08.20.)
- [15] 39/2021. (VII. 30.) ITM rendelet a Veszélyes Áruk Nemzetközi Közúti Szállításáról szóló Megállapodás (ADR)
- [16] MSZ EN ISO 11439:2002 Gázpalackok. Földgázhajtású gépjárművek nagynyomású palackjai
- [17] MSZ EN ISO 24431:2017 Gázpalackok. Varrat nélküli, hegesztett és kompozit palackok sűrített és cseppfolyósított gázokhoz (kivéve az acetilént). Ellenőrzés töltéskor
- [18] Research Institutes of Sweden Hydrogen Storage in Vehicles <https://energiforsk.se/media/26373/6-hydrogen-storage-in-vehicles-hans-pohl-bengt-ridell.pdf> (letöltés dátuma: 2022.05.29.)
- [19] Law K, Rosenfeld J, Han V, et al (2013) U.S. Department of Energy Hydrogen Storage Cost Analysis. Cupertino
- [20] Warren CD, Shaffer JT, Paulauskas FL, Abdullah MG (2002) Low Cost Carbon Fiber for the Next Generation of Vehicles: Novel Technologies. SAE Trans 111:719–726.
- [21] DuVall FW (2001) Cost comparisons of wet filament winding versus prepreg filament winding for Type II and Type IV CNG cylinders. SAMPE J 37:38–42.
- [22] TÜV Süd (2021) Speicherung von Wasserstoff. <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/wasserstoff-speicherung-von-wasserstoff> (letöltés dátuma: 2022.05.29.)
- [23] KRESZ fogalmak III. A közúti forgalommal kapcsolatos fogalmak, 2. § Fogalmak
- [24] Shell Hydrogen Study (2017) Energy of the Future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H₂
- [25] Linde Wasserstoff 3.0. https://produkte.linde-gase.de/db_neu/wasserstoff_3.0.pdf (letöltés dátuma: 2021.08.20.)
- [26] Gasido Wasserstoff Bündel kaufen: Eigenschaften und Kosten. <https://www.gasido.de/wasserstoff-buendel-kaufen-eigenschaften-und-kosten> (letöltés dátuma: 2022.05.18.)

A hidrogén hatása egyes acélok mechanikai tulajdonságaira

Effect of hydrogen on the mechanical properties of certain steels

Mérő Tamás^a, Lovas László^b

^aMagyar Földgáztároló Zrt., Művelési csoportvezető, merot@mfgt.hu

^bMagyar Földgáztároló Zrt., technológus, lovasl@mfgt.hu

Kulcsszavak

hidrogén, fugacitás, szénacél, saválló acél, nagynyomású, ridegedés

Keywords

hydrogen, fugacity, carbon steel, stainless steel, high pressure, loss of ductility

Absztrakt

Ez a cikk a hidrogén gáz egyes acélokon gyakorolt hatásával foglalkozik, mely nagy nyomáson, gáz halmazállapotban történő érintkezés során fordulhat elő. A cikk elemzi a hidrogén nyomásának, szennyezettségének hatását, az érintkezés hőmérsékletének és a terhelés frekvenciájának befolyását.

Abstract

This paper deals with the effect of hydrogen gas on certain steels, which can occur during high-pressure, gaseous contact. The article deals with the effect of hydrogen pressure, contamination, contact temperature and load frequency.

1. Bevezetés

Az Európai Unió Bizottsága a „Zöld Megállapodás” csomag céljainak lebontásaként 2020. július 8-án kihirdette a „Hidrogénstratégia a klímasemleges Európáért” c. stratégiát (továbbiakban: EU-hidrogénstratégia), amely az EU szektorintegrációs stratégiájának egyik alappillére.

Az EU-hidrogénstratégia a földgáz-infrastruktúrának szánt jövőbeli szerepéről az alábbiak szerint vélekedik:

„A meglévő földgázhálózat egy részének más célra történő átváltásával meg lehetne oldani a megújuló hidrogén nagyobb távolságra történő szállítását, és előrelépést kell tenni a nagyobb volumenű hidrogéntároló létesítmények kiépítése terén.”

A fenti célokkal összhangban az EU több országában a földgáz-infrastruktúra vállalatok által indított, innovációs pilot projektek száma folyamatosan nő. Ilyen pilot projekt a Magyar Földgáztároló Zrt. (továbbiakban: MFGT) által 2021. február 1-jén indított „Akvarin” projekt is, melynek keretén belül irodalmi adatok alapján megvizsgáljuk a meglévő nyomástartó rendszerek hidrogénnek való megfelelését. A cikkben összefoglaljuk az elméleti kutatási fázis egyes eredményeit és következtetéseit.

Az Akvarin projektről további információk itt találhatóak:

<https://mfgt.hu/hu-HU/Akvarin>

2. A hidrogén által okozott egyes hatások áttekintése

A szénacélok hidrogén indukálta ridegedését általában a hidrogén szilárdsági tulajdonságokra, a fáradásos repedések növekedési sebességére és a törési szívósságra gyakorolt hatása alapján értékelik. Ebben a cikkben olyan vizsgálati módszereket tárgyalunk, melyek célja a nagynyomású hidrogén fémes anyagokra való hatásának mérésére szolgál, a nagy hőmérsékleti hidrogénes károsodások (angol jelölése: HTHA) hőmérsékleténél kisebb (<400 °C) hőmérsékleteken. A mechanikai tulajdonságok vizsgálatai közt vannak olyan esetek, ahol nagynyomású hidrogéngázban végzett in-situ tesztlésre van szükség.

2.1 A hidrogén nyomásának hatása

A hidrogén okozta ridegedés mértéke erősödik a hidrogéngáz parciális nyomásának növekedésével, ugyanakkor, a mechanikai tulajdonságokra való hatása kis nyomáson az erősebb, nagyobb nyomáson kisebb befolyással rendelkezik. A mechanikai tulajdonságok leginkább a fém hidrogéntartalmától függenek. Egyes esetekben a mechanikai tulajdonságok korrelálnak a hidrogén nyomásának négyzetgyökével, mivel egy korlátozott nyomástartományban a hidrogén egyensúlyi rácskoncentrációja a hidrogénnyomás négyzetgyökével változik. Jobb azonban a nyomás helyett a hidrogén fugacitását figyelembe venni, mivel a fugacitás határozza meg a fémekben oldott hidrogén rácskoncentrációját nagy nyomáson. A fugacitás számításának módját a következő képlet írja le:

$$f = p e^{\frac{pb}{RT}}, \quad (1)$$

ahol:

- p: a hidrogéngáz parciális nyomása [MPa],
- b: konstans, hidrogén esetében 15,84 cm³/mol,
- R: univerzális gázállandó, 8,314 J/(mol·K),
- T: hőmérséklet [K].

Szobahőmérsékleten és kis nyomáson $f \approx p$.

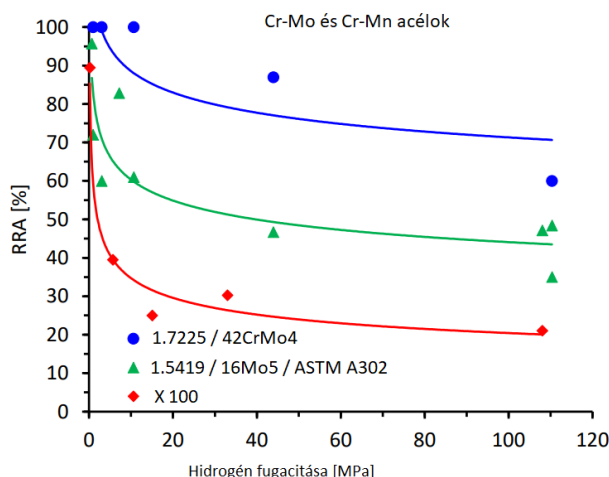
Az 2-4. ábrák könnyebb összehasonlíthatósága érdekében az RRA (relative reduction of area), relatív kontrakció mentén hasonlítjuk össze a mérési eredményeket.

Az RRA a kontrakció relatív (százalékos) csökkenését mutatja a normál atmoszférikus környezetben elvégzett vizsgálatokhoz képest. Számításának módja:

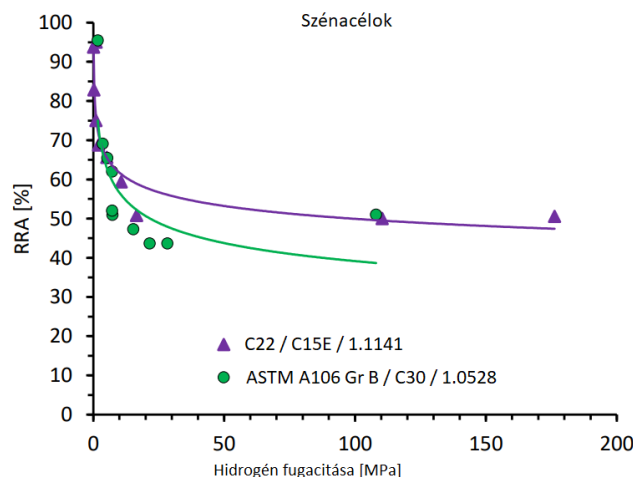
$$RRA = RA_{H_2} / RA_{ref} \cdot 100 [\%]. \quad (2)$$

Az RA_{H_2} a hidrogénben mért kontrakciót jelzi, míg az RA_{ref} pedig a referencia mérés eredménye. Az alábbiakban jellemző mérési eredményeket mutatunk be különböző acélokon.

A hidrogén hatása jól láthatóan a nyomás emelkedésével erősödik, majd fokozatosan állandósul. Szélesebb nyomástartományt vizsgáló tanulmányok szerint azonban igen nagy nyomáson a hidrogén hatása ismét erősödhet,



1. ábra: Cr-Mo és Cr-Mn acélok ridegedése a fugatás függvényében [1]



2. ábra: Szénacélok ridegedése a fugatás függvényében [1]

így említett telítésbe menő viselkedés csak egy közbelső nyomástartományban működik, ezen felül ismét felgyorsul (jellemzően 200 MPa felett).

2.2 A szennyezők hatása

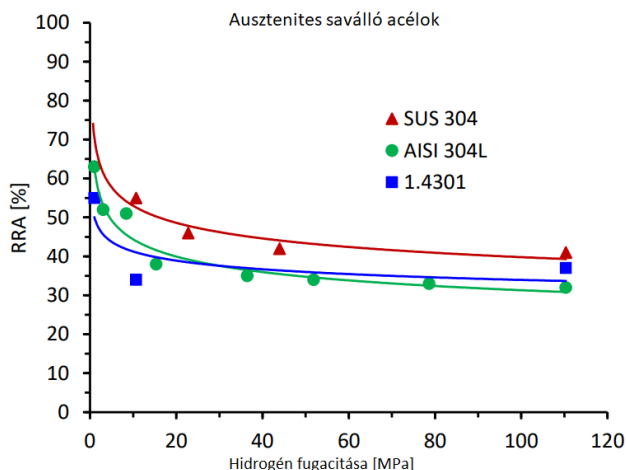
Sok olyan kutatást [2-6] végeztek, melyekben a hidrogénben jelenlévő gázzszennyezőkkel is foglalkoztak. A legtöbb ilyen vizsgálat célja az volt, hogy azonosítsák azokat a szennyezőket, amelyek inhibítoroként működnek, azaz hatásuk csökkenti, esetlegesen kiküszöböli a hidrogénnek a szénacélok mechanikai tulajdonságokra gyakorolt káros hatásait. Az O_2 , CO , SO_2 , CS_2 és N_2O azok a szennyezők, melyek hatásosnak bizonyultak azért, hogy akadályozzák a fém hidrogénfelvételével járó felületi reakciókat.

Szakítóvizsgálatokat és növekvő amplitúdójú fárasztóvizsgálatokat végeztek különböző oxigén-koncentrációjú hidrogéngázban. Minden eredmény azt mutatja, hogy növekvő oxigénszennyezéssel (O_2 koncentrációval) a mért tulajdonságok egyre inkább a levegőben vagy inert környezetben mért értékekhez tartanak. Általában azt gondolják, hogy a szennyező abszolút parciális nyomása az a változó, amely a hidrogén hatásának visszaszorításáért felelős, ezért a szennyező gáz koncentrációja egyre

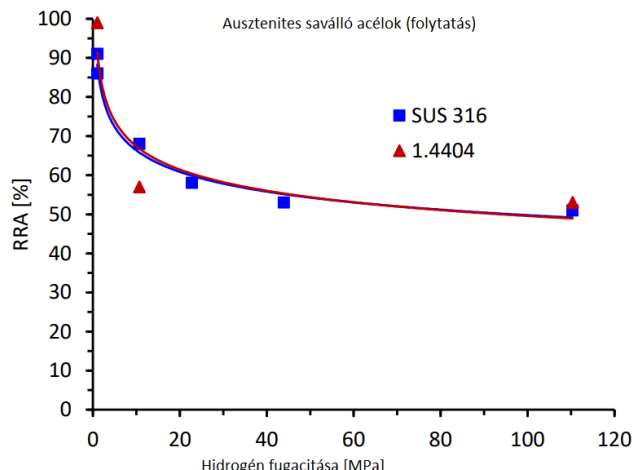
nagyobb jelentőségűvé válik a hidrogéngáz nyomásának növekedésével. Ugyanakkor azt is megmagyarázhatja, miért nem egységesek a hidrogén-acél kölcsönhatással kapcsolatos szakmai vélemények (gondoljunk például a hidrogént is tartalmazó városi gáz esetére, mely jelentősebb anyagszerkezeti probléma nélkül használható volt).

2.3 A hőmérséklet hatása

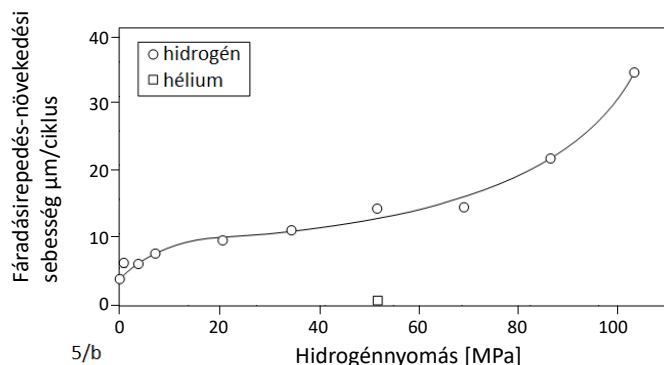
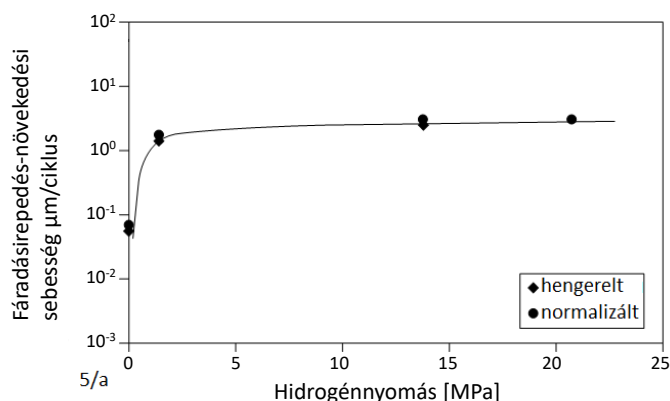
A hőmérséklet a hidrogén fémekkel való kölcsönhatását sokféle módon befolyásolja, gondoljunk a felületi reakciókra, beoldódásra, diffúzióra, csapdázódásra. E kölcsönhatások során a hidrogén ridegedésre gyakorolt hatása csak korlátozott hőmérsékleti tartományban történik. A ferrites acélok esetében a hidrogén által indukált ridegedés 200 és 300 K között a legintenzívebb. Az esetek többségében a ferrites acélokban oldott hidrogén miatti ridegedése kb. 423 K feletti hőmérsékleten megszűnik. Kimutatták, hogy az a hőmérséklet, amelyen állandó terhelés során maximális a repedésnövekedési sebesség, növekszik a hidrogéngáz nyomásának és az acél folyáshatárának a növekedésével. Ez arra utal, hogy a hőmérséklet a hidrogénben történő kezelés során, más paraméterekre is hatással van.



3. ábra: Cr-Ni ötvöztetésű, ausztenites korrózióálló acélok ridegedése a fugatás függvényében [1]



4. ábra: Ausztenites Cr-Ni-Mo ötvöztetésű, ausztenites korrózióálló acélok ridegedése a fugatás függvényében (folytatás) [1]



5. ábra: Fátégási repedés-növekedési sebesség a hidrogénnyomás függvényében

(a) SA106 acélnál;

$\Delta K = 22 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 1 Hz frekvencián és $R = 0,1$ [7] és

(b) HY-100 gyengén ötvözött acélnál (folyáshatár = 744 MPa)

$\Delta K = 55 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 1 Hz frekvencián és $R = 0,1$ [7]

2.4 A hidrogén hatása a fátégási repedés-növekedés sebességére

A szerkezeti fémekben, inert atmoszférában mért fátégási repedés-növekedési sebességet (angolul: fatigue crack growth rate, FCGR) a hidrogénes környezet tisztázására vagy akár annál nagyobb mértékben is növelheti. A legtöbb FCGR-mérést hidrogénezett atmoszférában hőkezelt, ferrites acélokon végezték. Ennek oka, hogy a legtöbb nyomástartó edény és csővezeték ferrites acélból készül.

A vizsgálatok szerint [8] egy küszöbnyomás felett a mechanikai tulajdonságok nem változnak tovább. Ezt mutatja az 5. ábra a) része, ami az SA 106 acél fátégási repedés-növekedési sebességének viselkedését ábrázolja növekvő hidrogénnyomás esetén.

Meg kell jegyezni, hogy az 5. ábra b) részén bemutatott adatok nagyon magas $\Delta K = 55 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ mellett készültek.

2.5 A terhelési frekvencia hatása

Általánosan elfogadott a bemutatott anyagok és vizsgálati tartományok esetében, hogy az FCGR a csökkenő frekvenciával növekszik. Ez a tendencia nem folytatódik a végtelenségig, az FCGR a frekvencia csökkenésével egy felső platót ér el, vagyis csökkenő frekvenciával addig nő, amíg el nem ér egy határfrekvenciát; ez alatt az FCGR független a frekvenciától. Ferrites acélok

esetében a technológiai szempontból releváns ΔK tartomány $20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ alatt van, ekkor ez a plató körülbelül az 0,1–1 Hz alatti frekvenciákon kezdődik. E terhelési ciklus időtartama elegendő ahhoz, hogy a hidrogén bediffundáljon, és teljes mértékben töltsen a repedéscsúcsot.

3. Összefoglalás

Számos változó befolyásolja a gáznemű hidrogénnek az acélok mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatásának mérését, pl. a hidrogén nyomása, tisztasága, a vizsgált hőmérséklet-tartomány és a mintára ható terhelés sebessége.

Az áttekintett irodalmi adatok alapján a következő megállapítások tehetők:

1. A hidrogénnek az acélok tulajdonságaira gyakorolt hatását célszerű a fugacitás függvényében vizsgálni.
2. Az acélok szakítóvizsgálata során mért kontrakciójának – úgy tűnik – telítődési tartománya figyelhető meg bizonyos fugacitást követően.
3. Mivel a gáz halmazállapotú hidrogénnek legkézenfekvőbb hatása a repedések növekedésére van, leginkább a törésmechanikai tesztek alkalmasak az acélok hidrogén indukált ridegedésének jellemzésére.
4. Figyelemmel kell kísérni a hidrogén gáz nyomását és tisztaságát.

Irodalomjegyzék

- [1] Thorsten Michler, Ken Wackermann, Frank Schweizer: Review and Assessment of the Effect of Hydrogen Gas Pressure on the Embrittlement of Steels in Gaseous Hydrogen Environment. <https://doi.org/10.3390/met11040637> (letöltés dátuma: 2022.05.04.)
- [2] G. G. Hancock, H. H. Johnson: Hydrogen, oxygen and subcritical crack growth in a high-strength steel, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, Vol. 236, 1966, pp. 513–516.
- [3] R. A. Oriani, P. H. Josephic: Testing of the decohesion theory of hydrogen-induced crack propagation, Scripta Metallurgica Vol. 6, 1972, pp. 681–688.
- [4] H. W. Liu, Y. L. Hu and P. J. Ficalora: The control of catalytic poisoning and stress corrosion cracking, Engineering Fracture Mechanics Vol. 5, 1973, pp. 281–292.
- [5] H. J. Cialone, P. M. Scott, J. H. Holbrook, K. Sieradzki, N. Bandyopadhyay: Hydrogen effects on conventional pipeline steels, Hydrogen Energy Progress, Vol. 4, 1984, pp. 1855–1867.
- [6] H. J. Cialone, J. H. Holbrook: Sensitivity of steels to degradation in gaseous hydrogen, Hydrogen Embrittlement: Prevention and Control, ASTM STP962, L. Raymond, ed., ASTM, Philadelphia, PA, 1988, pp. 134–152.
- [7] NASA-CR-124410, NASA, Marshall Space Flight Center AL, 1973
- [8] R. J. Walter, W. T. Chandler: Influence of Gaseous Hydrogen on Metals Final Report,
- [9] MSZ EN ISO 11114-4 Szállítható gázpalackok. A palack- és a szelepanyagok összeférhetősége a gáztartalommal. 4. rész: A hidrogénridegedésnek ellenálló acélok kiválasztásának vizsgálati módszerei

Példák Ausztriából zöld hidrogén előállítására napenergiával – “a szomszéd hidrogénje/üzemanyagtöltő kútja mindig zöldebb”

Examples from Austria of green hydrogen production from solar energy –
“your neighbour's hydrogen/fueling well is always greener”

Major Zoltán

Institute of Polymer Product Engineering, Johannes Kepler University Linz, Austria, tanszékezet, egyetemi tanár

Kulcsszavak

zöld hidrogén előállítása,
napenergia,
PET alapú hidrolízis,
voestalpine H2FUTURE projekt,
Fronius Solhub berendezések
üzemeltetése

Absztrakt

Jelenleg az egyik legfontosabb ökológiai kihívás a globális gazdaság dekarbonizációja. Ehhez szükséges mind a megújuló energiaforrások következetes bővítése, mind pedig ezeknek a megújuló erőforrásoknak az ipari, energetikai és mobilitási infrastruktúrákba való integrálása. A zöld hidrogén fontos szerepet játszhat a jövőbeli energiaátalakításban. Ezt a zöld hidrogént különféle megújuló energiaforrásokból (nap-, szél- és vízenergia) és például PEM (polymer electrolyte membrane) elektrolízissel lehet előállítani. A kulcskérdés az, hogy (i) a nem folyamatosan rendelkezésre álló megújuló energiaforrásokat hogyan lehet zökkenőmentesen integrálni a meglévő elektromos hálózatokba, ipari folyamatokba, valamint a rugalmas, egyéni mobilitási megoldásokba, és (ii) melyek a megbízható, hosszú távú üzemi körülmények közötti működés előfeltételei? A második részben röviden bemutatom a Power-to-X koncepció két aktuális példáján keresztül a zöld hidrogén napenergián alapuló ausztriai előállítását. Ezeket az alkalmazásokat a közelmúltban fejlesztették ki és építették meg ipari prototípusként Felső-Ausztriában. A H2Future rendszert egy Horizon kutatási projekt keretében fejlesztették ki, és a linzi voestalpine-ban helyezték üzembe, a Solhub rendszert a Fronius fejlesztette ki, és Wels-ben a Fronius telephelyén található. Mindkét rendszer jó példa a zöld hidrogén szigetszerű előállítására, miközben támogatja a dekarbonizációt mind az acélgártásban mind pedig a helyi mobilitásban.

Keywords

production of green hydrogen,
solar energy,
PET based electrolysis,
voestalpine H2FUTURE project,
Fronius Solhub

Abstract

Recently, one of the most important ecological challenge is the decarbonization of the global economy. It is necessary to consistently expand renewable energy sources and integrate these renewables in industry, energy, and mobility infrastructures. The green hydrogen can play an important role in this future energy transformation. This “green” hydrogen can be generated from various renewable energy sources (solar, wind and hydro) using e.g., PEM electrolysis. The key question are, (i) how can fluctuating renewable energy sources seamlessly be integrated into existing grids, ongoing industrial processes, and flexible, individual mobility and (ii) what are the prerequisites for a reliable long-term operation under service conditions?

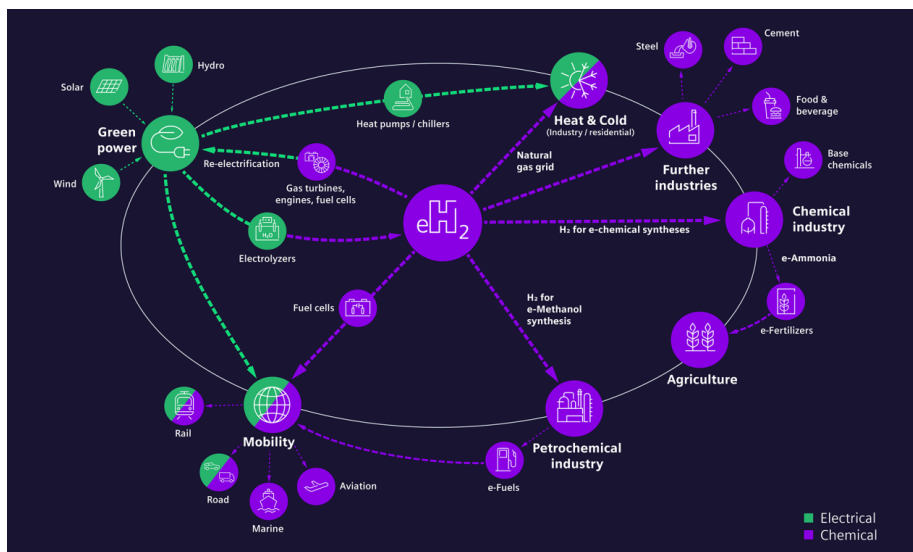
Two actual examples of the Power-to-X concept and the production of green hydrogen in Austria based on solar energy are briefly presented. These applications were recently developed and built as industrial prototypes in Upper Austria. The H2Future system is developed in a frame of a Horizon research project and was put into operation at voestalpine in Linz, the Solhub system was developed by Fronius and is located near to Wels at Fronius. Both systems are good examples for an Insel-like production of green hydrogen while for supporting the decarbonization in the steel production and in the local mobility.

1. Bevezetés

A hidrogénre manapság úgy tekintünk, mint a (közel)jövő legfontosabb energia átalakítójára, amivel kiválthatjuk az elmúlt évszázadokban használt fosszilis energiaforrásokat vagy energia átalakítókat. A hidrogén viszont gyakorlatilag semmilyen egyszerűen hozzáférhető formában nem áll rendelkezésre a természetben szokásos körülmények között. Annak ellenére, hogy hidrogént már régóta használunk nagyobb mennyiségben különféle ipari folyamatokban (1. ábra), a mennyiségű előállítás és mobilitási vagy energetikai célú felhasználás a közelmúltban kapott igazán világméretű jelentőséget. Mind a klímaváltozás elleni globális erőfeszítések, mind pedig az energiapolitika új geopolitikai prioritásai innovatív megoldásokat igényeltek. A közeljövő tudományos és technológiai fejlesztései, valamint a vezető ipari országok energiapolitikai és finanszírozási prioritásai majd eldöntik, hogy a hidrogénre alapuló technológiák beváltják-e a hozzájuk fűzött remények többségét és valóban a zöld átalakulás hajtóerői lesznek-e.

A hidrogén előállításának és felhasználásának különféle lehetőségeit foglalja össze az 1. ábra [1]. A sokféle

lehetőség közül napjainkban mindinkább előtérbe kerül a megújuló erőforrásokból származó villamos árammal történő hidrogén előállítása (ld. 1. ábra bal felső sarkában: green power). Az így előállított hidrogén mind különböző járművekben, mind pedig ipari felhasználásra kerülhet (pl. acélgártás). A Power-to-X elnevezést gyakran használják az elektromos energia folyékony vagy gáz halmazállapotú kémiai energiaforrásokká történő átalakítására elektrolízis és további eljárások során.



1. ábra: Hidrogén előállítása és felhasználása [1]

1. táblázat: A hidrogén típusai és színek kódjai [2, 3]

Szín	Üzemyanyag	Előállítás	Termékek
Barna/Fekete	Szén	Gőzreformálás vagy elgázosítás	$H_2 + CO_2$ (felszabadul)
Fehér	N/A	Természetben előforduló	H_2
Szürke	Természetes gáz	Gőzreformálás	$H_2 + CO_2$ (felszabadul)
Kék	Természetes gáz	Gőzreformálás	$H_2 + CO_2$ (egy részét megkötő és tárolja)
Türkiz	Természetes gáz	Pirólízis	$H_2 + C$ (szilárd)
Piros	Nukleáris energia	Katalitikus szétválasztás	$H_2 + O_2$
Lila/Rózsaszín	Nukleáris energia	Elektrolízis	$H_2 + O_2$
Sárga	Napenergia	Elektrolízis	$H_2 + O_2$
Zöld	Megújuló energia	Elektrolízis	$H_2 + O_2$

A különböző gyártási technológiák szerint előállított hidrogént többnyire színek kódokkal mutatják be. Az 1. táblázatban a különböző módon előállított hidrogén (process), színek kódjai és a végtermékek (products) láthatók.

Az igazi áttörést a zöld (green) hidrogén ipari szempontból versenyképes árú és megfelelő mennyiségű előállítása jelentené. Ehhez viszont megújuló energiaforrások szükségesek, ami legtöbbször a nap, szél, vagy a vízenergia alkalmazását jelenti. A vízenergiával ellentétben a másik két természeti forrás nem áll folyamatosan rendelkezésre, csak szakaszos üzemeltetés lehetséges. Ez nagyban befolyásolja a rendszer hatásfokát. Továbbá a villamos energiának, illetve az előállításnak magának kellene szén-dioxid-mentesnek lennie ahhoz, hogy az így előállított hidrogént zöldnek vagyis teljesen megújulónak tekintsük. A szükséges anyagok és berendezések gyártásának azonban meglehetősen nagy a karbon-lábnyoma. Ezekből a megújuló energiaforrásokból származó hidrogént különféle technológiai eljárásokkal lehet előállítani, amelyek közül a legelterjedtebb a víz hidrogénre és oxigénre történő felbontása egy elektrolízátorban megújuló villamos energia felhasználásával.

Mindenesetre a napenergiával is ott lehet gazdaságosan, megbízhatóan és folyamatosan villamos energiát előállítani, ahol sokat, intenzíven és egyenletesen süt a nap. Ennek korlátairól pl. egy német kutatóintézet (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Institut für Solarforschung) által a közelmúltban publikált tanulmányban egy részletes és kritikus összefoglalót találhatnak az érdeklődők [4]. A tanulmány szerint a napenergia hasznosítására nyilvánvalóan bolygónk ún. "sunbelt" részein van a legjobb lehetőség.

A napenergiával történő hidrogéntermelésre való alkalmasságot több tényező határozza meg. A közvetlen nap-sugárzás forrásai természetesen elsődleges fontosságúak. Nemcsak az év során felhalmozott kumulált közvetlen sugárzás játszik szerepet, hanem ennek időbeli eloszlása is. A tanulmány összehasonlítja az ún. koncentrált napenergia (concentrated solar energy, CSP) és a klasszikus napelemek (photovoltaic, PV), valamint a hibrid rendszerek (pv/csp) alkalmazásának feltételeit és korlátait is. Míg a CSP rendszerekhez nagy intenzitású közvetlen normál

besugárzásra (direct normal irradiation, DNI) van szükség, addig a fotovoltaius (PV) rendszerek alkalmazására alacsonyabb besugárzású helyeken is van lehetőség. A PV rendszerek előnye, hogy nem csak közvetlen, hanem diffúz sugárzást is hasznosítanak.

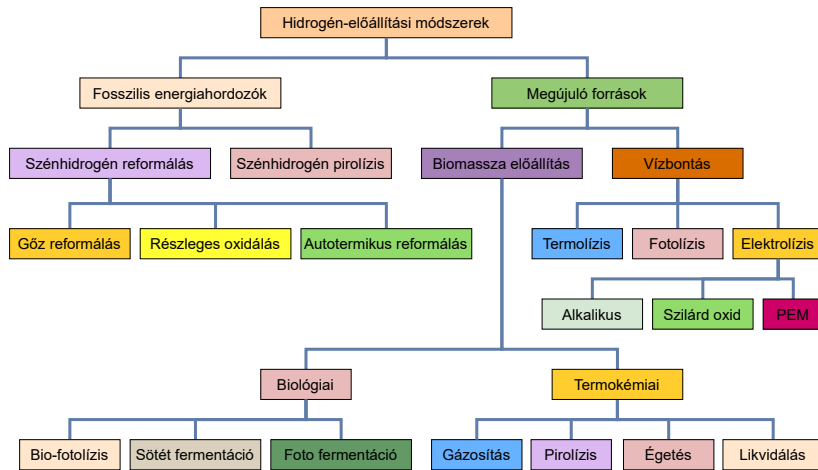
A CSP-n alapuló energiatermelő rendszerek általában olyan helyeken gazdaságosak, ahol a közvetlen normál besugárzás (DNI) meghaladja az 1800-2000 kWh/m²/a (körülbelül 5 kWh/m²/nap) értéket. A világ legjobb CSP helyszínein ezek a DNI-értékek 3000 kWh/m²/a felett vannak. Ilyen helyszínek találhatók például Chilében és Namíbiában a sivatagokban. Európa déli régióiban is vannak olyan CSP-re megfelelő helyek, ahol a napsugárzás átlagosan DNI = 1800 kWh/m²/a feletti értékeket ér el. Ezek a helyek főleg Dél-Spanyolországban, Olaszországban (Szicília) és Görögországban (Kréta) találhatók. A spanyolországi CSP telephelyeken átlagosan 2100 kWh/m²/a feletti DNI értékek érhetők el, így nem csoda, hogy Spanyolország jelenleg a világ legnagyobb telepített CSP-kapacitásával rendelkező országa kb. 2,3 GW teljesítménnyel.

A tanulmány szerint a fotovoltaius energiatermelés esetében a globális termelési potenciál akár 4.000.000 TWh_{el}/a értéket is elérheti. Csak az EU 28 tagállamban (2019-es állapot) összesen 11.000 TWh_{el}/év potenciál rejlik. Az árak meredek csökkenése a fotovoltaius rendszerek gyors elterjedéséhez vezetett. Ez jelenleg világszerte évente további 120 GW_p/év körüli névleges teljesítményű PV modulokkal növekszik, és a már telepített kapacitások meghaladják az 500 GW_p-t.

A fenti számok egyértelművé teszik, hogy a PV fontos szerepet fog játszani a jövő energiarendszerében. Hátránya, hogy a CSP-vel ellentétben a villamos energia termelés hőtárolással nem szabályozható. Ez azt jelenti, hogy egy napelemes rendszernek – még nagyon jó helyen is, pl. Észak-Afrikában – nincs több mint 2000 teljes terhelési üzemórája évente. Ha az elektrolízist közvetlenül a napelemes villamos energiával működtetik, akkor az alacsony kihasználtság viszonylag magas hidrogéntermelési költségekhez vezet. Ezért ésszerűnek tűnik a PV és CSP rendszerek kombinációja. Az ilyen PV/CSP hibrid rendszerek optimalizálásával foglalkozik egy további tanulmány [5]. Ennek a publikációnak az egyik legfontosabb általános végkövetkeztetése, hogy a végső optimalizált design és a meghatározott költség ("levelized cost of hydrogen" (LCOH)) erősen függ a műszaki-gazdasági bemeneti adatoktól. Így például az elektrolízáló berendezések gyorsabb fejlesztése, a költségcsökkentés és a nagyobb elektrolízáló hatásfok elérése egyértelműen kedvezne a PV alapú hidrogén termelés további terjedésének.

Mint már korábban is említettem, hidrogén előállítására különféle megoldások állnak rendelkezésre, amelyeket vázlatosan a 2. ábra mutatja be [6]. Az ábra jobb oldalán látható elektrolízisre is különféle módszerek állnak rendelkezésre, amelyeket vázlatosan a 3. ábra mutat be [7].

Napjainkban a fenntarthatóság és környezetvédelem szempontjából a PEM (proton exchange membrane) elektrolízist tartják a legígéretesebb technikának zöld hidrogén nagy tisztaságú és hatékony előállításához. Itt meg

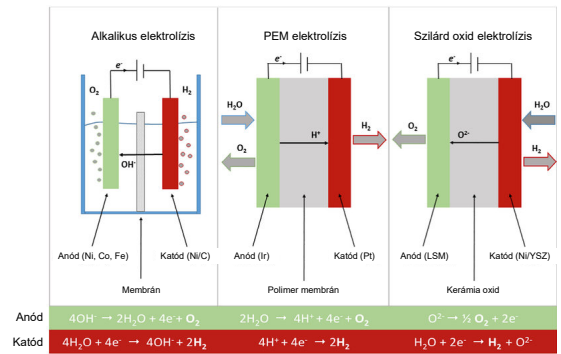


2. ábra: Hidrogén előállítása [6]

kell azonban jegyezni, a vízfelhasadásos technológiák összességében a globális ipari hidrogén termelés mindössze 4 %-át teszik ki napjainkban. A zöld hidrogén előállításának szükségessége miatt azonban a közelmúltban jelentősen megnövekedett a PEM elektrolízis technológia iránti érdeklődés. Többek között egy német disszertációban részletes leírást találnak az érdeklődők az elektrolízis fizikai alapjairól, a jelenlegi műszaki megoldásokról, az alkalmazott mérési módszerekről, valamint a továbbfejlesztés lehetőségeiről és korlátairól [8]. Ez a disszertáció az alapja például a Siemenshez kapcsolódó, a honlapjain publikált műszaki leírásoknak és magyarázatoknak is [9].

Mind a Rosenstiel publikáció [10], mind pedig több más hasonló tanulmány [21-22] végkövetkeztetése az, hogy nagy mennyiségben, gazdaságosan és magas ellátási biztonság mellett akarunk zöld hidrogént előállítani, akkor a további kulcstechnológia az elektrolízis. Itt nemcsak a folyamat továbbfejlesztésére van szükség, hanem a fenti feltételeknek megfelelő berendezések fejlesztésére, gyártására és mielőbbi piaci bevezetésére is. Az ilyen berendezések mind magas fokú hardveres és szoftveres digitalizációval kell, hogy rendelkezzenek. Ennek fényében, egyáltalán nem meglepő, hogy a nagy globális mechatronikai és energetikai vállalatok intenzív fejlesztésekbe kezdtek ezeken a területeken. Így például a Siemens is erőteljes fejlesztésekbe kezdett az energiatermelés zöld átalakításának szinte összes lehetséges irányában. Az elektrolízis területén külön meg kell említeni, hogy a vállalat Berlin Moabit (Siemens Energy Switchgear Plant Berlin) városrészében építi fel az első gigawatt kapacitású elektrolízis berendezések gyártókapacitását, ami várhatóan 2023-ban kezdi meg a berendezések gyártását [23]. Az első ilyen nagy kapacitású berendezések piaci megjelenése erőteljes lökést adhat mind piaci alapú, mind pedig közösségi finanszírozású zöld hidrogén elektrolízis rendszerek telepítéséhez [2, 10].

Ha én befektető vagy energiapolitikai döntéshozó lennék, azonnal megvizsgálnám a fentihez hasonló tanulmányok megfontolásai alapján a zöld hidrogén elektrolízis rendszerek pilot-projektekben való telepítésének és üzemeltetésének a lehetőségét. Miután egyik sem vagyok a



3. ábra: A hidrogén elektrolízisének típusai [7]

fenti személyekből, megpróbálok a környezetemben meglevő példákat találni, valamint bekapcsolódni regionális és/vagy szélesebb nemzetközi projektekbe. Úgy gondolom azonban, hogy csak empirikus módszerekkel nem lehet kielégítő megoldást elérni. Olyan szimulációk is szükségesek, amik a változók széles tartományában tudják vizsgálni az összefüggéseket és a lokális telepítésnek leginkább megfelelő megoldást képesek szolgáltatni.

2. Ausztriai zöld hidrogén berendezések rövid bemutatása

A bevezető után a továbbiakban két olyan ausztriai példát mutatok be a Power-to-X koncepcióra és a zöld hidrogén előállítására vonatkozóan röviden, amiket Felső-Ausztriában a lakó- és munkahelyem közelében a közelmúltban fejlesztettek ki és építettek meg mint ipari prototípust:

- Az egyik példa a voestalpine linzi telephelyén a H2FUTURE projekt keretében, több ausztriai vállalat (voestalpine, VERBUND, Siemens, Austrian Power Grid, K1-MET Kompetencia Centrum és TNO holland kutatási központ) közreműködésével és jelentős EU támogatással megvalósított, a világ akkori (2019) legnagyobb CO₂-mentes hidrogén-előállító kísérleti üze. A projekt partnerek a zöld hidrogén ipari előállításának többféle szempontjait vizsgálják, amely során zöld hidrogén hosszú távon a fosszilis tüzelőanyagokat kívánja helyettesíteni az acélgártásban.
- A másik példa a welsi székhelyű Fronius nevű osztrák vállalat Solhub nevű berendezése, ami szintén zöld hidrogént állít elő napenergiából. A Solhub berendezés lehetővé teszi önkormányzatok, kereskedelmi és ipari vállalatok számára lokális, fenntartható hidrogén alapú mobilitási és energetikai megoldások kipróbálását és hosszú távú üzemeltetését. Ezt a berendezést személyesen is megtekinthettem a cég telephelyén.

Az alapelv és a technikai megoldások mindkét esetben hasonlóak, az egyik legfontosabb különbség a felhasználás céljában és az előállított hidrogén mennyiségében van. A másik különbség a projektek jellegében látható. A H2Future projekt [11] több szereplős, a résztvevők valamennyien specialistának és nemzetközi szinten is vezető-technológia tulajdonosnak számítanak. Emellett a kb.18MEurós költségek egy jelentős részét az Európai



a)



b)

4. ábra: A H2Future berendezés a voestalpine linzi telephelyén [12]:
(a) az épület, (b) az elektrolízis berendezés (Siemens)

Unió fizette (European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Hydrogen Europe and N.ERGHY). A Fronius SolHub projektje dominánsan üzleti finanszírozású, legalábbis az elérhető nyilvános információk szerint. Miután valamennyire ismerem az osztrák kutatás finanszírozási rendszert, valószínűsíthető, hogy legalábbis közvetett módon mind tartományi, mind pedig szövetségi finanszírozás is van benne (public-private partnership). A cég képviselője azonban megerősítette a túlnyomóan piaci alapú finanszírozás szándékát a további fejlesztések során is.

A lokális szigetszerű megoldásnak természetesen vannak előnyei és hátrányai. Ha a hagyományos megoldásokban gondolkodunk, akkor először a globális megoldások, nagyüzemi finomítás, előállítás és hosszú szállítási útvonalak kerülnek előtérbe. A lokális üzem megspórolja a hosszú idejű és a hidrogén esetén eléggé körülményes tárolást és a hosszú szállítási útvonalakat. Azt, hogy melyik megoldás, milyen gazdasági és technikai környezetben előnyösebb, jelenleg elég nehéz objektíven eldönteni. A hasonló berendezésekkel megszerezhető valós üzemeltetési tapasztalatok és a költségek mindenképpen hatékonyan támogatják a jövőben szükséges döntéseket a megújuló energiák és a zöld hidrogén alkalmazásában.

3. H2FUTURE

Mint az iparág egyik vezető technológiai képviselője, a voestalpine a környezetvédelem terén is egy következetes és hosszú távú stratégiát követ az acélgártás dekarbonizálására. Egyértelmű célokat tűztek ki maguk elé a CO₂-kibocsátás további közvetlen csökkentésére az acélgártásban az elkövetkező években. A voestalpine jelenleg is vizsgálja egy új hibrid technológia megvalósíthatóságát a meglévő kokszt/szén alapú nagyolvasztó és a zöldárammal üzemeltetett elektromos ívkemencék kombinációjával, valamint részben zöld hidrogén felhasználásával. Tekintettel a gazdasági versenyképesség és a termelési költségek jelenlegi szintjére, ez a lehetőség körülbelül egyharmadával csökkentené a vállalatspecifikus CO₂-kibocsátást 2030 és 2035 között. Hosszú távon a voestalpine csoport célja, hogy fokozatosan növelje a zöld hidrogén felhasználását az acélgártásban, és így 2050-re

több mint 80 %-val csökkentse a CO₂-kibocsátást. Ehhez a szándékok és sok-sok pénz mellett azonban megfelelő technológia is szükséges.

Ennek a megújuló energiára (napenergia) és zöld hidrogénre épülő acélgártásnak a legfontosabb feltétele, hogy elegendő mennyiségben és gazdaságosan elérhető áron álljon rendelkezésre megújuló energia és a zöld hidrogén. Csak így lehet ténylegesen versenyképesen működtetni a jövő technológiáit nagyipari környezetben. A világ üzembeállítása idején legnagyobb zöld hidrogén kísérleti üzemének üzembe helyezésével a voestalpine linzi telephelyén jelentős lépést tettek ennek a technológiai átalakulásnak az előmozdítása érdekében. Az épület, amiben a berendezés található a 4.a ábrán látható. A H2Future projekt 2017-ben indult, a berendezés 2019 végén került átadásra Linzben és 2020 márciusa óta folyamatosan működik. Linzben ugyan nem süt annyit a nap, mint azt a bevezetőben említett tanulmányok szerint kellene a gazdaságos működéshez (nem optimális DNI értékek). Ugyanakkor az acélmű itt van Linzben, és a zöld(ebb)é válás a telephely megtartásának valószínűleg elengedhetetlen feltétele. A telephely megtartása pedig létfontosságú az osztrák gazdaság egésze és a helyi munkaerőpiac szempontjából is. Tehát, van kényszer a váltásra és vannak források ennek a rövid -és hosszútávú finanszírozására is [12].

A rendszer egyik legfontosabb része az elektrolízis. A Siemens Silyzer 300 berendezésben 6 MW teljesítménnyel kb.1200 m³ zöld hidrogént állítanak elő (4.b ábra). A berendezés is a korábban röviden bemutatott PEM (proton exchange membrane) elektrolízis technológiát használja (lásd 3. ábra).

A H2FUTURE prototípus berendezés egy fontos mérőföldkö az elektrolízis nagyipari felhasználásában: Az acéltipar mellett potenciálisan alkalmazható olajfinomítóknak, a műtrágyagyártásban és más magas hidrogénigényű iparágakban is. A projekt világos célja, hogy mint egy alkalmazott ipari kutatólabor a próbaüzem során megvalósítsa a jövőbeli ipari projekteket. A legfontosabb kutatási területek a PEM elektrolízis berendezés hatékonysága és élettartama, a korrózió intenzitása (ez a PEM technológia egyik gyenge pontja), a karbantartás tervezhetősége, a szükséges vízminőség, az előállított hidrogén tisztasága

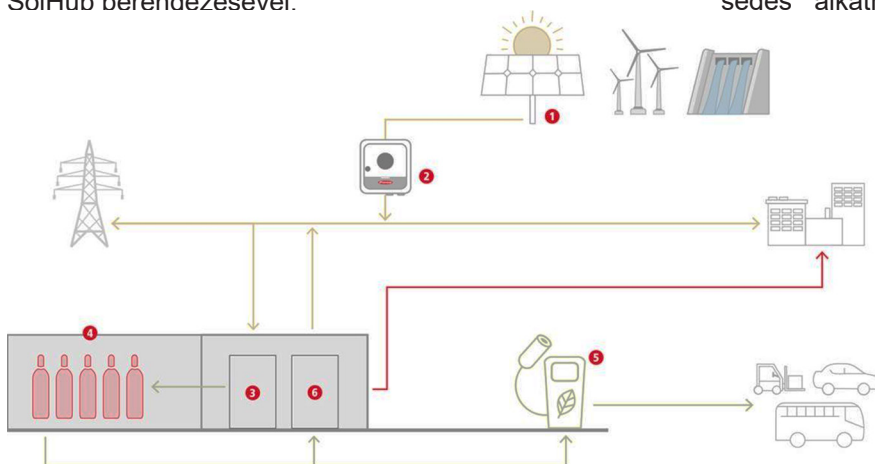
és természetesen az üzemelés valós költségeinek a meghatározása. Az üzemeltetők jelenleg meglehetősen visszafogottak ezen műszaki információk megosztásában, mind szabadalmi, mind pedig üzleti okokból. Ha az ígéreteknek megfelelően a nyári szabadságok után sikerül bejutnom a telephelyre és kapok további műszaki információkat is, igyekszem ezeket megosztani és további esetleges magyar vonatkozású projekteimben is felhasználni.

Amikor ezeket a sorokat írtam a voestalpine közlést az első csökkentett CO₂ felhasználással gyártott acél (Greentech-steel) kereskedelmi megjelenését [13,14]. A cég közleménye szerint a CO₂-kibocsátás csökkentését a gyártási folyamat átalakításával éri el, például a hagyományos koksz részleges hidrogéntartalmú redukálószerekkel való helyettesítésével. A voestalpine Ausztria legnagyobb CO₂-kibocsátója, megelőzve az OMV-t és a Wien Energie-t. Csak a linzi gyárban kibocsátott 9,4 millió tonna üvegházhatású gáz több, mint 900.000 osztrák lakos együttes kibocsátásának felel meg (ez kb. a lakosság 10 %-a). Ebből is látható a következő hat évben betervezett évi 5 %-os csökkentés jelentősége, amihez a cég által előállított zöld hidrogén jelentősen hozzájárulhat.

4. Fronius Solhub – Zöld hidrogén előállítása napenergiával egy moduláris berendezésben

A Fronius nevű osztrák vállalat (Wels, Felső-Ausztria) nemcsak a hegesztésben érdekelt és gyárt világszínvonalú berendezéseket, hanem az innovatív energetikai rendszerek területén is. A Solhub nevű berendezés zöld hidrogént állít elő napenergiából, és egy rendszerszintű és szigetszerű technikai megoldást kínál a zöld hidrogén lokális előállítására, tárolására és felhasználására. A berendezés második prototípusa Wels közelében, Steinhausban (Felső-Ausztria) a Fronius közelmúltban alapított hidrogén kompetencia centrumának a telephelyén található. Mondhatjuk úgy, hogy ez egy zöldmezős beruházás zöld hidrogén előállítására.

Az 5. ábra vázlatosan mutatja be a napenergiából történő zöld hidrogén előállításának folyamatát a Fronius SolHub berendezésével.



5. ábra: Zöld hidrogén előállítása napenergiából: előállítás, tankolás, tárolás és újra átalakítás a Fronius SolHub berendezésével [15], 1) nap, szél és vízenergia, 2) Fronius inverter, 3) elektrolízis, 4) H₂ tartály, 5) tankoszlop, 6) üzemanyag cella

A berendezés lehetővé teszi a villamosenergia-ellátás-, a mobilitás- és az energiaellátás innovatív összekapcsolását. Ez egy fontos konkrét lépés a 24 órás napsütéses jövőkép gyakorlati megvalósítása felé, amelyben a világ energiaszükségletének nagy részét megújuló források fedezik. Ez persze ma még csupán álom, és nem is biztos, hogy világszerte akár a távolabbi jövőben teljeskörűen megvalósítható, mindenesetre a Solhub berendezés kifejlesztése és eddigi prototípusai az egyik első és az mindennapokban is alkalmazható lépést jelenti ebben az irányban. Amit általában Ausztriában és specifikusan több ismert osztrák vállalatban nagyon értékelek, nemcsak filozófnak tanulmányok szintjén, hanem megcsinálnak és kipróbálnak új rizikós dolgokat is. Miután Wels és környéke ugyanannyi napsütéses órában sütkezik, mint Linz, ezáltal a DNI értékek itt is alacsonyok. Viszont egy ilyen kísérleti berendezés kifejlesztéséhez és próbaüzeméhez itt áll rendelkezésre az összes műszaki és gazdasági feltétel.

A tervek szerint minden új berendezést egyedi igények szerint terveznek és építenek, valamint az állapotfelügyelet és a karbantartás is egyedileg tervezhető. A moduláris, kb. 9m nagyságú konténerek tetszés szerint méretezhetők és összekapcsolhatók. A komplex fotovoltaikelektrolízis-nagynyomású tároló rendszer folyamatos állapotfelügyelete és állandó optimalizálása kiemelt jelentőségű. Az ehhez készített szoftvert egyelőre még hétpecsétetes titokként kezeli a cég, és így az általánosságokon túl semmilyen információ nem áll rendelkezésre. Az viszont gondolom nyilvánvaló, hogy a hasonló berendezések szíve-lelke lesz a szoftver. A berendezés mind 150 és 900 bar közötti nyomástartományban tud -45 °C alá hűtött hidrogént tárolni. Nemcsak a zöld hidrogén előállítása, hanem a megbízható tárolása is energiaigényes. A napelemes rendszer által termelt villamos áram erre a célra is fordítható, és a szoftver optimalizálni tudja a rendelkezésre álló villamos áram elosztását az előállítás, tárolás és kiszolgálás között. A tárolók közvetlenül csatlakoznak töltőállomásokhoz, amikkel az erre alkalmas járművek különböző nyomású hidrogénnel tankolhatók. A hidrogén betankolásáról, a szükséges alkatrészekről, szabályokról, tömítéstechnikáról

valamint az alkalmazott szelepekről egy következő cikkben szeretnék beszámolni a Japánban szerzett személyes tapasztalataim és irodalmi adatok alapján.

A cég tervei szerint a SolHub berendezés lehetővé teszi önkormányzatok, kereskedelmi és ipari vállalatok számára a lokális, fenntartható hidrogén alapú mobilitási és energetikai megoldások kipróbálását és hosszú távú üzemeltetését.

A berendezés első prototípusa, amint az a 6. ábrán látható, Welsben, a cég egyik telephelyén található, második továbbfejlesztett változat Wels közelében, Steinhausban látható a cég hidrogén Kompetencia Centrumának telephelyén (6. b ábra) [16].



a)



b)

6. ábra: A Fronius SolHub kísérleti berendezései [16]
a) első prototípus Welsben, b) második változat Steinhausenban

A harmadik berendezést a közeljövőben adják át az első vállalkozó kedvű felhasználóknak Herzogenburgban (Alsó-Ausztria, NÖ) [17]. Ezzel az első, a felhasználó telephelyén felállított berendezéssel a Fronius komoly üzemeltetési és főleg karbantartási tapasztalatokat szerezhet a további berendezések fejlesztéséhez és üzemeltetéséhez.

A berendezés tulajdonosa és üzemeltetője egy SAN-Group nevű multinacionális vállalat, ami többek között a zöld energiák terjesztését is menedzseli világszerte [18]. Az első kapavágás 2021 májusában volt, amit személyesen a NÖ tartomány miniszterelnöke, Johanna Mikl-Leitner asszony végzett el, ezzel is hangsúlyozva a projekt társadalmi jelentőségét. A berendezés átadása a SAN telephelyén a közeljövőben várható.

A berendezést 1,5MW villamos energia előállítására méretezték. Az előállított hidrogént többnyire a SAN-csoport járműparkjában használják majd fel, de a régió más partnerei is részesedhetnek belőle. A berendezéssel naponta hozzávetőleg 100 kg zöld hidrogént állítanak elő, amivel mintegy 16 személyautó tankolható, illetve hidrogén hajtású buszokkal vagy teherautókkal több, mint 1500 kilométert lehet majd megtenni ezzel a mennyiséggel.

A további ipari és fogyasztói alkalmazásokhoz és az egységek kiválasztásához érdekes lehet hasonló célú berendezések összehasonlítása. Szívesen közreműködne egy olyan nemzetközi projektben, ami megvizsgálja a

különböző berendezések gyakorlati alkalmazhatóságát, elemzi alkalmazásuk korlátait (teljesítmény és élettartam), és megteszi az első lépéseket egy általános zöld hidrogén felhasználói kézikönyv kidolgozására. A szigetszerű telepítés mellett a berendezések hálózati összekapcsolása lehet a másik érdekes lehetőség. Ehhez a hardverek mellett okos szoftverek is kellenek. Ez esetleg magyar vállalkozások számára is lehetőséget jelenthet a technológia megismerésére, együttműködésre és magyarországi adaptációjára.

Miután annak a valószínűsége, hogy egy helyen 2-3 hasonló berendezést üzembe állítanak, gyakorlatilag nulla, így ez az összehasonlító tanulmány egy szoros nemzetközi együttműködés keretében képzelhető el. Erre kiválóan alkalmasak lennének pl. az ún. határháromszög területek (Ausztria, Magyarország, Szlovákia, vagy délen Szlovénia) egy Interreg Europa vagy Interreg Danube együttműködés keretében.

5. Összefoglalás

Mint azt egy minap (2022. június 14.) megjelent internetes bejegyzés is megállapítja [19] „a megújuló és alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogéntermelés alapvető fontosságú lenne a klímavédelmi harcban, de 2050-re a globális végső energiamixnek csak 5 százalékát fogja kitenni, ami nem éri el az éghajlati célok eléréséhez szükséges mértéket – közölte hétfőn a norvég DNV globális energetikai tanácsadó cég [20]”.

Miután a hidrogén és különösen a zöld hidrogén előállításának nagy az energiaigénye, ez drágává és gazdaságtalanná teszi a közvetlen villamosenergia-felhasználással összehasonlítva. A fosszilis tüzelőanyagok villamos energiával való helyettesítése azonban egy elég nehéz feladat pl. a légi közlekedésben, a hajózásban és az olyan nagy hőigényű ipari folyamatokban, mint pl. az acélgyártás. A megújuló energiával vagy alacsony szén-dioxid-kibocsátással előállított zöld hidrogén számottevően csökkentheti a karbonlábnyomokat ezeken a területeken. A közlekedés, mind a személy, mind pedig az áruszállítás speciális



7. ábra: A Herzogenburgban levő SolHub berendezés terve [17]

helyzetben van. A mobilitás jelenlegi szintjének megtartásához vagy további növeléséhez az energiatárolót is magunkkal kell vinnünk. A mai technológia szinten ez vagy az akkumulátorokat, vagy pedig valamilyen gáz/folyékony halmazállapotú energiahordozót igényel.

Az Ausztriában eddig megvalósult „zöld hidrogén” előállítási projektek ennek a két fent említett, neuralgikus pontnak a lokális megoldását célozzák meg.

- A gyártóhely fenntarthatósága érdekében nemcsak a linzi voestalpine, de az egész osztrák acélgártás szénlábnymát mindenképpen csökkenteni kell. A napenergia szempontjából kevésbé vonzó és előnyös telephely ellenére a H2FUTURE berendezés egy fontos gyakorlati előrelépés ebben az irányban. A berendezés kísérleti üzeme során a berendezéseket gyártók és az üzemeltető részletes, mind műszakilag, mind gazdaságilag megalapozott tapasztalatokat szereznek egy viszonylag kedvezőtlen helyen levő berendezés hatásfokáról, valamint az üzemeltetés további korlátairól.
- A Solhub berendezés Alsó-Ausztria kísérleti üzeme során az eredeti célok megvalósítása mellett még össze lehetne hasonlítani a zöld villamos energia átalakításának és tárolásának lehetséges módjait is. Az eredetileg tervezett hidrogén üzemmód mellett a napenergiából származó zöld energia akkumulátorok töltésére is felhasználható. Egy osztrák-magyar projekt konzorcium keretében erre az összehasonlító vizsgálatra tettünk javaslatot és jelenleg is intenzíven vizsgáljuk egy közös projektterv kidolgozásának a lehetőségét a már fentebb említett Interreg Central Europe és az Interreg Danube vagy más Horizon Europe felhívások keretében. Ennek előnyei különösen a magyar partnerek számára világosak. A próbaüzem során valós méréseken alapuló összehasonlítással sok időt és pénzt takaríthatunk meg a további fejlesztésekre vonatkozóan.

Irodalomjegyzék

- [1] Siemens Energy honlapja: Hydrogen Solutions: https://www.siemens-energy.com/global/en/offers/renewable-energy/hydrogen-solutions.html?gclid=EAlaIqobChMIs9zR8pqO-AIVxY1oCR0qlwo8EAAYAAEgIIYvD_BwE (megtekintés dátuma: 2022.06.10.)
- [2] H2Bulletin honlapja: Hydrogen colours codes: <https://www.h2bulletin.com/knowledge/hydrogen-colours-codes/> (megtekintés dátuma: 2022.06.10.)
- [3] Ricardo rail honlapja: Opinion: Decoding the Hydrogen T-Rainbow: <https://rail.ricardo.com/news/opinion-decoding-the-hydrogen-t-rainbow> (megtekintés dátuma: 2022.06.10.)
- [4] Roeb, M., Brendelberger, S., Rosenstiel, A., Agrafiotis, C., Monnerie, N., Budama, V., Jacobs, N., Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende, Teil 1: Technologien und Perspektiven für eine nachhaltige und ökonomische Wasserstoffversorgung; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Institut für Solarforschung; Köln, Germany, 2020.
- [5] Rosenstiel, A., Monnerie, N., Dersch, J., Roeb, M., Pitz-Paal, R., Sattler, C., Electrochemical Hydrogen Production Powered by PV/CSP Hybrid Power Plants: A Modelling Approach for Cost Optimal System Design. *Energies* 2021, 14, 3437., <https://doi.org/10.3390/en14123437>
- [6] S. Shiva Kumar, V. Himabindu: Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review, *Materials Science for Energy Technologies* 2 (2019) 442–454). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299119300035> (megtekintés dátuma: 2022.06.10.)
- [7] Hermann Wolfmeir: H2FUTURE – GREEN HYDROGEN, HYDROGEN MEETING FUTURE NEEDS OF LOW CARBON MANUFACTURING VALUE CHAINS, 7th May 2021 (elhangzott a H2GreenSteel WEB Workshop-on az ESTEP rendezésében)
- [8] Philipp Lettenmeier: Entwicklung und Integration neuartiger Komponenten für Polymerelektrolytmembran- (PEM) Elektrolyseure, Uni Stuttgart, 2018
- [9] Siemens Energy honlapja: www.siemens-energy.com (megtekintés dátuma: 2022.06.10.)
- [10] Stefan Brendelberger, Andreas Rosenstiel, Anton Lopez-Roman, Cristina Prieto and Christian Sattler, Performance analysis of operational strategies for monolithic receiver-reactor arrays in solar thermochemical hydrogen production plants, *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (2020) 26104–26116 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.191>
- [11] H2future honlapja: <https://www.h2future-project.eu/> (megtekintés dátuma: 2022.06.10.)
- [12] Voestalpine, 2019-11-11-h2future-weltweit-groesste-gruene-wasserstoffpilotanlage-erfolgreich-in-betrieb-gegangen, pdf, 2019 (voestalpine bocsátotta rendelkezésre)
- [13] ORF news: Voestalpine lieferte ersten CO2- <https://oe.orf.at/stories/3160532>, 2022 (megtekintés dátuma: 2022.06.10.)
- [14] voestalpine honlapja: <https://www.voestalpine.com/group/de/media/>, 2022 (megtekintés dátuma: 2022.06.10.)
- [15] Fronius, SE_BRO_SOLH2UB_DE.pdf, 2021 (megtekintés dátuma: 2022.06.10.) (Fronius bocsátotta rendelkezésre)
- [16] Fronius solar energy honlapja: Fronius errichtet Wasserstoff-Kompetenzzentrum und neuen Solhub in Steinhaus: <https://www.fronius.com/de/solarenergie/ueber-uns/news/h2cc-solhub-210121> (megtekintés dátuma: 2022.06.10.)
- [17] Fronius solar energy honlapja: Erster Fronius Solhub in Umsetzung: www.fronius.com/de/solarenergie/ueber-uns/presse/erster-fronius-solhub-in-umsetzung-29062021 (megtekintés dátuma: 2022.06.10.)
- [18] SAN Group honlapja: SAN Group builds first green hydrogen production facility in Lower Austria: <https://www.san-group.com/news/san-group-builds-first-green-hydrogen-production-facility-in-lower-austria> (megtekintés dátuma: 2022.06.10.)
- [19] Index hírek: Hiába helyettesíthetné a földgázt, mégsem kell a világnak: <https://index.hu/gazdasag/2022/06/14/zold-hidrogen-kibocsatascsokkentese/> (megtekintés dátuma: 2022.06.14.)
- [20] Deep dive into the future of hydrogen: Hydrogen energy forecast to 2050: https://www.dnv.com/powerrenewables/?utm_campaign=energy&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_content=241436554463&utm_term=dnv%20gl%20energy&gclid=EAlaIqobChMlmtYlMrav-AIVSo9oCR3jHg6WEAAYASAAEgJuuvD_BwE (megtekintés dátuma: 2022.06.14.)
- [21] Takach, M., Sarajlic, M., Peters, D., Kroener, M., Schuldt, F., von Maydell, K., Review of Hydrogen Production Techniques from Water Using Renewable Energy Sources and Its Storage in Salt Caverns. *Energies* 2022, 15, 1415. <https://doi.org/10.3390/en15041415>
- [22] Agyekum, E.B.; Nutakor, C.; Agwa, A.M.; Kamel, S. A Critical Review of Renewable Hydrogen Production Methods: Factors Affecting Their Scale-Up and Its Role in Future Energy Generation. *Membranes* 2022, 12, 173 <https://doi.org/10.3390/membranes12020173>
- [23] Siemens Energy: Siemens Energy to start production of hydrogen electrolyzers in Berlin: <https://press.siemens-energy.com/global/en/pressrelease/siemens-energy-start-production-hydrogen-electrolyzers-berlin> (megtekintés dátuma: 2022.06.20.)

Az atomerőművek szerepe a hidrogén-előállításban

Utilization of nuclear power plants for hydrogen production

Imre Attila Rikárd^a, Horváth Ákos^b

^aEnergiatudományi Kutatóközpont, Tudományos Tanács elnöke, imre.attila@ek-cer.hu;

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, tanszékvezető, egyetemi tanár, imreattila@energia.bme.hu

^bEnergiatudományi Kutatóközpont, főigazgató, horvath.akos@ek-cer.hu

Kulcsszavak

elektrolízis,
vízbontás,
hidrogén gazdaság,
napelempark,
hulladék hő

Absztrakt

A közeljövőben a hidrogén – ezen belül a zöld hidrogén – iránti igények meredek növekedése várható. Egyrészt a jelenlegi, fosszilis eredetű hidrogénre épülő igényeket kell kiváltani, másrészt a felmerülő új igényeket (közlekedés, energiatárolás) is ki kell elégíteni. Ehhez elengedhetetlen a megbízható, kiszámítható hidrogéntermelés, ami a hagyományos megújuló alapú villamosenergiára alapozva egyelőre nehezen kivitelezhető. Ebben a rövid cikkben bemutatjuk, hogyan lehet az atomerőművek bevonásával, de a megújulókat is megtartva, gyors megoldást adni a fenti problémára.

Keywords

electrolysis,
water splitting,
hydrogen economy,
photovoltaic system,
waste heat

Abstract

In the near future, demand for hydrogen – including green one – is expected to increase sharply. Current demand based on fossil hydrogen will have to be replaced, while new emerging needs (transport, energy storage) have to be fulfilled. This requires reliable and predictable hydrogen production, which is currently difficult to achieve based on solely conventional renewable electricity. This short article will show a simple solution to this problem, using electricity partly from nuclear power plants.

1. Bevezetés

A jövőben mind a vegyiparban, közlekedésben, energetikában egyre nagyobb szerepe lesz a zöld hidrogénnek. Egyes helyeken jelenleg is intenzív a hidrogén-felhasználás; pl. a nagyüzemi mezőgazdasághoz nélkülözhetetlen műtrágya gyártásában. Jelenleg ezt a szükségletet fosszilis eredetű (a földgáz metán-tartalmából készült) hidrogénnel oldják meg, de ez a forrás nem karbonmentes és nem megújuló. Más területeken (közlekedés, energetika) a hidrogén szerepe korábban elhanyagolható volt, de a közeljövőben ez megváltozik. Az üzemanyagként való felhasználása egyre szélesebb körű: már hazánkban is vannak hidrogénnel hajtott autók, kishajók és buszok; a közeljövőben várható a kamionok, vonatok és nagyobb hajók megjelenése is [1]. Ennek csak egyik oka a környezetvédelem; a másik az, hogy fosszilis üzemanyagokkal egyre kevésbé lehet ellátni a növekvő igényeket. Mind a vegyipar, mind a közlekedés igényeit így más hidrogén-forrásból kell kielégíteni és erre a következő években-évtizedekben a legjobb módszernek a víz bontása tűnik [2,3].

2020-ban Magyarországon 160 ezer tonna hidrogént állítottak elő (emellett még volt kb. 100 ezer tonna, melléktermékként keletkező hidrogén is). A 160 ezer tonna kizárólag szürke hidrogén volt, azaz metánból állították elő gőzreformálással, keletkező széndioxid megfogása nélkül. 115 ezer tonnát a mezőgazdaság (a műtrágyához szükséges ammónia gyártása), 20 ezer tonnát a vegyipar és 25 ezer tonnát a kőolaj-finomítók használtak fel. 2050-re a termelést szeretnék 580 ezer tonnára növelni (emellett továbbra is kb. 100 ezer tonnányi hidrogén keletkezik, melléktermékként). Az 580 ezer tonnából 473 ezer tonna zöld hidrogén lenne, amit vízből állítanak elő, zöld-energia befektetésével és CO₂-kibocsátás nélkül. A maradék 107 ezer tonna a tervek szerint kék hidrogén lenne; itt a gyártás közben keletkező CO₂, de azt megfognák és eltárolnák, azaz a légkör irányába a CO₂ kibocsátás nulla lenne. A megtermelt 580 ezer tonnából ammóniagyártásra 133 ezer tonna fordítódna, a vegyipar 24 ezer tonnát,

míg az addigra jelentősen összezsugorodott kőolaj-finomítás 9 ezer tonnát igényelne. Emellett megjelenéne az új igények, úgymint 75 ezer tonna az acélgépgyártáshoz, 212 (!) ezer tonna a közlekedéshez, 120 ezer tonna "bekeverés, kiváltás" (azaz a földgáz helyettesítése bizonyos területeken), míg 7 ezer tonna a cementipar és a hozzá kapcsolódó iparágak igényeit fedezné [4]. Az új igények közül a két nagy a közlekedés (hidrogénüzemű járművek, beleértve a teherfuvarozást is), valamint a földgáz kiváltása (beleértve a szezonális energiatárolást is). A hidrogén fontos szerephez juthat az energiatárolásban, hisz a jelenlegi tudásunk szerint egy nagyobb város több napos vagy hosszabb idejű ellátására képes tároló csak úgynevezett Power-to-Gas alapú lehet [5]. Mindemellett fontos megjegyezni, hogy jelenleg a hidrogén hosszabb idejű, nagy mennyiségű tárolása még nehézkes [6], de napos-hetes tárolásra [7], illetve "közvetett módon" (azaz mikor a hidrogénből könnyebben tárolható tüzelőanyagot, pl. metánt [8] vagy ammóniát [9] állítanak elő) szezonális tárolásra már most is alkalmazható lenne.

Látható, hogy az igények nagyok, de vajon mi lehet a megoldás, hogyan tudunk megfelelő mennyiségű "zöld" hidrogént gyártani?

1. táblázat: Hidrogén-termelési technológiák (normál: víz-alapú; dől: metán alapú; vastag: szén alapú; aláhúzott: egyéb szerves alapú)

Piacérett	Ígéretes	Kísérleti
Elektrolízis - alkáli	Elektrolízis - SOE	Biológiai
Elektrolízis - PEM	Metán szárazreformálás	fotokatalitikus
Metán gőzreformálás	Termikus vízbontás	elektrohidrogenezis
	Termokémiai - vizes	fotoelektrokémiai
	<u>Termokémiai - szerves</u>	radiolízis
	<u>Részleges oxidáció (syngas-előállítás)</u>	
	Szén elgázosítás	
	<u>Biomassza elgázosítás</u>	

Az 1. táblázatban a jelenleg ismert hidrogén-előállítási eljárásokat igyekeztünk összefoglalni [10, 11]. Feltüntetettük

az alapanyagokat (víz, földgáz metánja, szén, illetve egyéb szerves anyag); természetesen egyes esetekben (pl. a szenes módszerénél) szintén szükség van vízre. Ha zöld hidrogént akarunk gyártani, akkor a kiinduló anyag víz vagy biomassza lehet; ez utóbbi az "egyéb szerves anyag" kategóriába sorolható. Figyelembe véve a rendelkezésre álló biomassza korlátos voltát, valamint az ezt használó piacérett technológia hiányát, valószínűsíthető, hogy a közeljövőben nem a biomassza-alapú módszerek lesznek az elsődleges zöld-hidrogént előállító módszerek, így a továbbiakban inkább a víz alapúakra koncentrálnak. Ezek közül szintén kizárjuk a még kísérleti stádiumban levőket, hisz esetükben legfeljebb csak találgatni lehet arról, hogy ipari méretekben valaha is használhatóvá válnak-e. Így maradt két piacérett elektrolízis-alapú technológia (alkáli és PEM), valamint három ígéretes technológia, a magas hőmérsékletű elektrolízis (SOE), a termikus vízbontás, valamint a víz alapú termokémiai technológiák.

2. Az atomenergia szerepe a hidrogén-előállításban

Az atomerőművek/atomreaktorok esetében három "termék" lehet, ami felhasználható a hidrogén-előállításban: a kijövő villamosenergia, a kijövő hő és a sugárzás. A harmadikkal nem foglalkozunk; a radiolízis-alapú vízbontás várhatóan nem lesz ebben az évszázadban releváns.

2.1 A megtermelt hő hasznosítása

Hidrogén-előállításnál hőre több technológiánál is szükség van; gyakran ez az egyetlen hajtóerő, gyakran pedig csak elősegíti a folyamatot.

Elsőként vizsgáljuk meg a termikus vízbontást [12]. Talán ez tűnik a legtriviálisabb hő-alapú megoldásnak. Tudni kell, hogy – sok más kémiai reakcióhoz hasonlóan – nem definiálható olyan hőmérséklet-határ, ami alatt a víz bomlik, felette viszont nem. Már szobahőmérsékleten is előfordul, hogy egy vízmolekula szétesik (vagy éppen keletkezik), de ezen a hőmérsékleten a keletkező hidrogén mennyisége elhanyagolható. 800-1200 °C tartományban már jól észlelhető a gázképződés, de dominánssá csak a 2500-3000 °C tartományban válik.

A fenti hőmérsékletek mindegyike elvileg elérhető nukleáris bomlással, de kérdés, hogy ezt a gyakorlatban is meg lehet-e tenni. A vízbontásnak mindenképp a reaktoron kívül kell zajlania, azaz a hőt valahogy ki kell hozni. Teljesen egyértelmű, hogy olyan reaktoroknál, ahol a víz a moderáló/hűtőközeg, ott a reaktor belsejében nem lehet olyan hőmérséklet, ahol a víz már elbomlana, így ilyen hőmérsékletű hő a reaktoron kívülre sem juttatható. A negyedik generációs reaktorok között van megfelelően magas hőmérsékletű, ahol a hűtőközeg sóolvadék vagy hélium; itt megoldható az 1000 °C körüli kimeneti hőmérséklet, így nem kizárt, hogy a jövőben építhetők olyan reaktorok, amelyeknél a keletkező hő termikus vízbontásra hasznosítható. A jelenleg működő, vagy a közeljövőben tervezett atomerőművek viszont nem alkalmasak erre a célra.

A fenti módszereknél egy hátrányt még meg kell

említenünk (ami a lentebbi módszerek egy részére is igaz), mégpedig azt, hogy a hidrogén és oxigén térben ugyanott keletkezne, robbanásveszélyes keveréket képezve. Ez utóbbi nem túl szerencsés, főként azért, mert a magas hőmérsékletű hő csak nagy veszteséggel lenne messzire szállítható, így a hidrogén-előállítás valószínűleg a reaktorokhoz közel történne, ami nagyon komoly biztonsági kihívást jelentene.

Másodikként a vizes termokémiai módszereket vizsgáljuk meg [13]. Ezekben a folyamatokban a vízbontás nem a víz-molekula közvetlen szétesésével, hanem más kémiai reakcióval (pl. kén-jód ciklus) történik; ezen reakciók viszont megfelelő sebességgel csak magas hőmérsékleten játszódnak le; a jelenleg ismert-használt folyamatok 600-900 °C tartományában. Ezen esetekben a reaktorból kijövő hőnek a folyamat fenntartásához szükséges hőt kellene biztosítania. Sajnos ezen reakciók többségénél a megkívánt hőmérséklet még mindig túl magas ahhoz, hogy pl. egy nyomottvízes reaktor primer köréből kijövő hővel biztosítható legyen. Ez esetben is igaz, hogy új típusú (negyedik generációs) reaktoroknál elképzelhető olyan koncepció, amikor a hő egy része villamosenergia-termelésre, más része pedig termokémiai alapú hidrogéntermelésre fordítódik. Emellett lehetséges, hogy a jövőben találnak olyan reakciót, amihez egy nyomottvízes reaktor primerköri vízhőmérséklete is elegendő lehet.

Az eddigiek alapján úgy tűnik, hogy a jelenleg üzemelő atomerőművekben a hő nem használható hidrogén-előállításra. Valószínűleg ez igaz, de egy kiskapu lehetséges, bár a technológia ott még messze van a piacérettégtől. Ez a biológiai alapú hidrogén-előállítás, melynél az erőművek szekunder vagy esetleg terciér hője (ez utóbbi az ún. hulladékhő) lenne hasznosítható, hogy a biológiai-biókémiai folyamathoz szükséges hőmérsékletet biztosítsa. Még nincs piacérett termék, sőt, egyelőre még ígéretesnek mondható technológia sem, de a kutatás intenzív, nem kizárt, hogy a közeljövőben ezen a területen áttörés történik. Ez esetben a jelenlegi erőművek jelentős része alkalmas lenne a biológiai alapú hidrogén-gyártásra.

2.2 A megtermelt villamosenergia hasznosítása

Az atomerőművek legtriviálisabb hasznosítása a hidrogén-előállításban a megtermelt villamosenergiával történő elektrolízis, amely esetén a keletkező hidrogén karbonmentesnek mondható (hiszen karbonmentesen megtermelt villamosenergiával állították elő), viszont nem megújuló alapú. Mindemellett várhatóan a következő egy, de maximum két évtizedben ez a módszer is elfogadható lesz.

Ennek a megoldásnak a kétségtelen hátránya (nem megújuló alapú) mellett van előnye is a megújuló (PV- vagy szél-alapú) villamosenergiából való előállítással összehasonlítva. Az egyik az, hogy a jelenlegi energiamixben sok kis-közepes PV- vagy szélerőmű van, amelyek gazdasági szempontból túl kicsik ahhoz, hogy helyben állítsák elő a hidrogént, viszont a hálózatra kötésük (amivel biztosítható lenne, hogy a megtermelt villamosenergia eljusson egy vagy több központi elektrolizátorhoz)

stabilitási problémákat okozhat. Természetesen építhetők megfelelően nagy PV-telepek is (házánkban is létezik 100MW csúcsteljesítményű), de ez esetben sem biztos, hogy a megtermelt hidrogén szállításához megfelelő infrastruktúra (pl. nagy tartálykocsik által is használható utak) áll a rendelkezésre; ez az atomerőművek esetében nem jelent problémát.

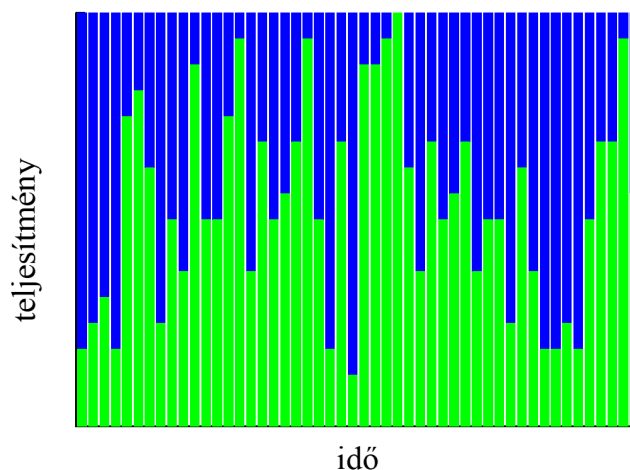
Egy másik előny, hogy a három, jelenleg dominánsnak tűnő elektrolizátor-típus közül (alkáli, PEM, SOE [14]) egyedül a PEM az, amelyik képes a viszonylag gyors indításra-leállításra és elég jól tolerálja a gyorsan változó bemenő teljesítményt; amelyek olyan körülmények, amik egy PV-erőműnél gyakran előfordulnának. A másik két típus csak folyamatos üzemben tud jól termelni és mindkettőnek van előnye a PEM-mel szemben. Az alkáli elektrolizátoroknál ez egyértelműen az ár, ami akár fele-harmada is lehet az ugyanakkora bemenő teljesítményű PEM egységeknél. Természetesen ezt árnyalja az alkáli elektrolizátorok alacsonyabb hatásfoka, de sok esetben így is alacsonyabbak lesznek a fajlagos költségek. A SOE, vagy Solid Oxid Electrolyzer típus esetében a hatásfok szignifikánsan magasabb, mint a PEM technológia esetében, de egyelőre a magas árak akadályozzák a berendezések elterjedését. Itt még kiemелendő, hogy ennél a típusnál a működéshez szükséges magas hőmérséklet esetleg szintén biztosítható lenne a primer-köri hő megcsapolásával. Sajnos – mint már említettük – ha az elektrolizátorokat nukleáris alapú villamosenergiával használnák, az nem számítana megújulónak és egy-két évtizeden belül várhatóan az így előállított hidrogén sem számítana zöldnek.

A termikus bontással ellentétben elektrolízisnél a vízbontás termékei (a hidrogén és az oxigén) térben elkülönülve keletkeznek, így ez az előállítási módszer ebből a szempontból biztonságosabbnak tűnik.

2.3 A fény az alagút végén....

Az eddigiek alapján a jelenlegi atomerőműveknek nem sok szerep juthat a hidrogén-termelésben (főként nem a közeljövőben), de van egy terület, ahol mégis fontos szerepe lehet, az pedig a kombinált PV- és nukleáris alapú elektrolízis.

Az előző alfejezetben említettük az alkáli és SOE típusú elektrolizátorokat, amikben olcsóbban vagy nagyobb hatásfokkal lehetne hidrogént előállítani, ha állandó bemenő teljesítményt tudnánk biztosítani. Tételezzük fel, hogy egy létező atomerőmű mellé építenek egy nagyteljesítményű PV-erőművet, amely nem termelne a hálózatra (már ez is pozitívum, hisz a hálózat egyre kevésbé tudja kezelni ezeket a termelőket), hanem csak hidrogén-előállításra használnánk a megtermelt áramot. Sajnos az előállított teljesítmény nagyon ingadozó, mint az 1. ábrán is látható; ez nem mehet közvetlenül az elektrolizátorra. Természetesen megfelelő mennyiségű akkumulátor közbeiktatásával az ingadozások kisimíthatók, de ez többlet-beruházást (akkumulátorok), valamint veszteséget (akkumulátorokon fellépő tárolási veszteség, típustól függően 2-15%) jelent. Itt lehet a megoldás a kerítés másik oldalán álló atomerőmű, amely az ingadozó



1. ábra: Változó kapacitású PV-alapú termelés (zöld) kiegészítése nukleáris alapú villamosenergiával (kék), állandó bemeneti teljesítmény biztosításához vízbontó berendezéseknél (sematikus ábra)

PV-teljesítményt kipótolva állandó bemenő teljesítményt tudna biztosítani az elektrolizátoroknak.

Az így létrejött rendszernek két előnye lenne:

- Részben (esetenként jelentős részben) megújuló forrásokból származó, teljes egészében karbonmentes villamosenergiából állítanak elő a hidrogént.
- Olcsóbban (alkáli elektrolizátorok) vagy magasabb hatásfokkal (SOE), azaz alacsonyabb fajlagos költséggel, kiszámíthatóbb tömegárammal állítana elő hidrogént.

Ez a megoldás már létező erőműveknél is implementálható; extra költségei szinte nem is lennének, így megfelelő PV-parkokkal rendelkező atomerőműveknél akár már hónapokon belül beindulhatna az ilyen típusú termelés. A PV-parkokkal nem rendelkező atomerőműveknél jobbra van megfelelő szabad hely a napelemek kihelyezéséhez, így ez a megoldás általánosan is jónak mondható.

3. A távolabbi jövő

Az elektrolízisnek megvannak a saját problémái, így hosszú távon lehetséges, hogy nem ez lesz az ipari méretű hidrogén-előállításra a legjobb módszer. A problémák között megemlítendő, hogy a felhasználandó víz speciális tisztítást igényel, az elektrolizátorokban levő katalizátorok anyaga (jelenleg ezek általában drágák és nagy mennyiségben nehezen hozzáférhetők), valamint az is, hogy az elektrolízis – mint technológia – jóval több vizet használ, mint maga az elbontott mennyiség, így vízben szegény területeken problémássá válhat az alkalmazása. Ez utóbbi területen egyes országokban megoldást jelenthetnek a jelenleg intenzíven kutatott, tengervíz használatos technológiák.

A fenti problémák nem jelentkeznek a víz termikus bontásánál, így hosszú távon ebben a módszerben is sok lehetőség van, ezért előfordulhat, hogy a jövőben megjelennek olyan reaktorok, amelyek fő célja az ipari méretű vízbontáshoz szükséges magas hőmérsékletű és nagy fluxusú hő előállítása.

Rövidítésjegyzék

SOE	szilárd oxid elektrolizátor
PV	fotovoltaikus
PEM	polimer elektrolit membrán (elektrolizátor)

Irodalomjegyzék

- [1] A hidrogén lehet a klímasemlegesség kulcsa – interjú Lepsényi Istvánnal, a Magyar Hidrogéntekológiai Szövetség elnökével. Szerző: Horváth Dániel, Innotéka, 2022 május, pp27-31.
- [2] IEA Reports – The Future of Hydrogen (2019) <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [3] WEC Report – International Hydrogen Strategies (2020) <https://www.weltenergieat.de/publikationen/studien/international-hydrogen-strategies/?cn-reloaded=1>
- [4] Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája (2021) <https://kormany.hu/dokumentumtar/magyarorszag-nemzeti-hidrogenstrategiaja>
- [5] Sterner, M.; Stadler, I. Handbook of Energy Storage: Demand, Technologies, Integration; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018; ISBN 978-3-662-55503-3.
- [6] Abdalla M. Abdalla, Shahzad Hossain, Ozzan B. Nisfindy, Atia T. Azad, Mohamed Dawood, Abul K. Azad: Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review, Energy Conversion and Management, (2018), vol. 165, pp. 602-627.
- [7] Kummer Kristóf, Attila R. Imre. 2021. "Seasonal and Multi-Seasonal Energy Storage by Power-to-Methane Technology" Energies 14, no. 11: 3265. <https://doi.org/10.3390/en14113265>
- [8] Csedő Zoltán, Sinóros-Szabó Botond, Zavarkó Máté: Seasonal Energy Storage Potential Assessment of WWTPs with Power-to-Methane Technology, Energies, 13 : 18 p. 4973 (2020) <https://doi.org/10.3390/en13184973>
- [9] Jussi Ikäheimo, Juha Kiviluoma, Robert Weiss, Hannele Holttinen: Power-to-ammonia in future North European 100 % renewable power and heat system, International Journal of Hydrogen Energy, (2018) vol. 43, pp. 17295-17308, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.121>
- [10] Pavlos Nikolaidis, Andreas Poullikkas: A comparative overview of hydrogen production processes, Renewable and Sustainable Energy Reviews 67 (2017) 597–611, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- [11] Younas, Muhammad; Shafique, Sumeer; Hafeez, Ainy; Javed, Fahad; Rehman, Fahad: An Overview of Hydrogen Production: Current Status, Potential, and Challenges, Fuel, (2022) vol. 316, No. 123317, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123317>
- [12] J. Lédé, F.Lapicque, J.Villermaux: Production of hydrogen by direct thermal decomposition of water, International Journal of Hydrogen Energy (1983) vol. 8, pp.675-679
- [13] Marek Jaszczur, Marc A. Rosen, Tomasz Sliwa, Michał Dudek, Ludwik Pienkowski: Hydrogen production using high temperature nuclear reactors: Efficiency analysis of a combined cycle, International Journal of Hydrogen Energy (2016) vol. 41, pp7861-7871
- [14] Gerse Károly: Energiatárolók, Akadémiai Kiadó (2020) ISBN: 978 963 454 493 7, DOI: 10.1556/9789634544937



A legmodernebb H₂ technológia a Lindétől

Megoldások a termeléstől az üzemanyagellátásig

Mint a teljes hidrogéntekológiai know-how-val rendelkező vállalat, biztosítjuk, hogy partnereink zéró emisszióval mozoghassanak.

Innovatív megoldásaink a hidrogén üzemanyag-technológia teljes skáláját lefedik – a gyártástól kezdve a H₂-adagolókon át a H₂-töltőállomásokig, az infrastruktúra kiterjed a buszparkok ellátásától, az anyagmozgatáson keresztül, az autók üzemanyagellátásáig.

Szolgáltatásaink széles skáláját a teljes hidrogén értéklánccal is kiegészítjük.

Zéró károsanyag kibocsátás a Linde által.

www.lindegas.hu

PEM tüzelőanyag-cella új anyagtechnológiai áramlási mezővel

PEM Fuel Cell with a flow field used a new material technology

Kereszty Balázs^{a,c,*}, Braun Barnabás^a, Vida Ádám^a, Tompos András^b, Szijjártó Gábor^b

^aBay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhazsnú Nonprofit Kft., ^bEötvös Loránd Kutatási Hálózat,

^cInnovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem

*Kapcsolattartó: balazs.kereszty@bayzoltan.hu

Kulcsszavak

tüzelőanyag-cella,
bipoláris lemez,
hidrogén,
tervezés és szimuláció,
mérés

Absztrakt

Az egyre szigorodó környezetvédelmi előírások miatt a tüzelőanyag-cellás technológiák napról napra nagyobb teret nyernek. Mivel a témakör még nagyságrendnyi fejlesztési lehetőséget tartogat, így kutatócsoportunk (Bay Zoltán Kutatóközpont PROD divízió, Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Természettudományi Kutatóközpont, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék Neumann János Egyetem) is elindult ezen a területen, egy olyan vízióval, amely világszinten újítás lehet. Az eddigi csatornás gázvezetés helyett egy új, anyagtechnológiai áramlási mezővel valósítottuk meg a gázok membrán-elektroda egyesítésére (MEA - Membrane Electrode Assembly) vezetését. A tervezés során Computational Fluid Dynamics (CFD) szimulációt is készítettünk a várható molekula mozgásokról a mezőn belül. A cella gyártását követően egy tüzelőanyag-cella mérőberendezésen is megvizsgáltuk, hogy életképes-e ez a fajta innovatív megoldás.

Keywords

fuel cell,
bipolar plate,
hydrogen,
design and simulation,
investigation

Abstract

Fuel cell technologies are gaining ground day by day due to increasingly stringent environmental regulations. As the topic still is considerable potential for development, our research team (Bay Zoltán Nonprofit Ltd. for Applied Research Division PROD, Eötvös Loránd Research Network the Research Centre for Natural Sciences, Department of Innovative Vehicles and Materials John von Neumann University) has also initiated research in this field with a vision that can be a global innovation. Instead of the general channel gas pipeline, we implemented the piping of the gases to Membrane Electrode Assembly (MEA) with a flow field which uses a new material technology. During the design, we also performed a Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation of the expected molecular movements within the field. After the production of the cell, we also tested the viability of this type of innovative solution on a fuel cell measuring device.

1. Bevezetés

Az egyre szigorodó környezetvédelmi előírások miatt a tüzelőanyag-cellás technológiák napról napra nagyobb teret nyernek. Mivel a témakör még nagyságrendnyi fejlesztési lehetőséget tartogat, így kutatócsoportunk (Bay Zoltán Kutatóközpont PROD divízió, Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Természettudományi Kutatóközpont, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék Neumann János Egyetem) is elindult ezen a területen egy olyan vízióval, amely világszinten újítás lehet.

Manapság többfajta tüzelőanyag-cellát különböztetünk meg, ezek között a különbség elsősorban a használt elektrolit fajtája, és természetesen a bevezetett reagensek között van (1. ábra).

A PEM típusú cellák között két altípus létezik, a kis hőmérsékleten (LT – Low Temperature: 50-100 °C) és a nagy hőmérsékleten (HT – High Temperature: 120-180 °C) működők. A magasabb üzemi hőmérsékletű cellák előnye, hogy kevésbé érzékenyek a bevezetett gázok szennyezéseire, a hatásfokuk pedig magasabb, ugyanakkor a HT típusú PEM cellák drágábbak és műszaki érettségük nincs olyan szinten, mint az LT változat esetében.

A PEM cellák esetében az alkalmazott elektrolit egy 1,0mm-nél vékonyabb, hidratált protoncserélő membrán, amely csak a hidrogén-ionokat, azaz a protonokat engedi át, az elektronokat megfogja.

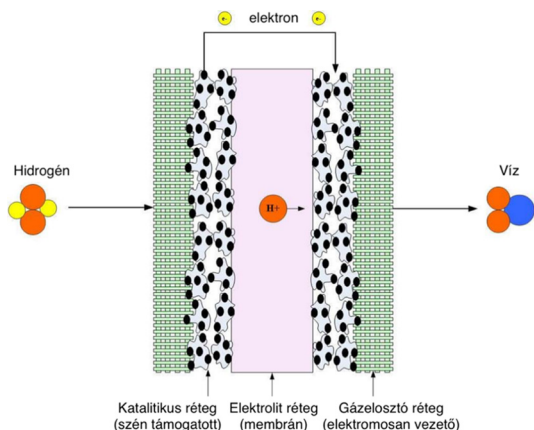
Az aktív felület, a membrán-elektrod egység (MEA) és a gázokat rávezető, illetve a hűtést biztosító bipoláris lemez anyagtechnológiai és gépészeti kialakítása az egész köteg felépítését meghatározza. Az aktív felületen (MEA) történik meg a protoncsere, azaz az energia konverzió,

Típus	Üzemanyag	Elektrolit	Hatás fok	Üzemi hőmérséklet	Felhasználás
PEMFC Protoncsere membrános	Tiszta H ₂ , O ₂ , Levegő	Nafion membrán	55-75%	70-200°C	Járműipar Erőmű
SOFC Szilárd oxidos	H ₂ , Földgáz, Széngáz, Levegő, O ₂	Szilárd cirkónium-oxid	60-65%	600-1100°C	Gőzturbinás erőmű Áramforrás
DMFC Direkt metanolos	Metanol, O ₂ , Levegő	Nafion / MOR membrán	25-35%	80-130°C	Hordozható elektronikai termékek
PAFC Foszforsavas	Tiszta H ₂ , O ₂ , Levegő	Tömény folyékony foszforsav	50-60%	150-210°C	Áramforrás Erőmű
AFC Alkáli elektrolitos	Tiszta H ₂ , O ₂	30%-os kálium-hidroxid oldat	60-70%	<80°C	Járműipar Hadipar Úripar
MCFC Olvadt karbonátos	H ₂ , Földgáz, Széngáz, Levegő, O ₂	Olvadt lítium-, nátrium-, és kálium-karbonát	50-60%	>600°C	Gőzturbinás erőmű Áramforrás

1. ábra: Legelterjedtebb tüzelőanyag-cella típusok [5]

amely során a kémiai energiából elektromos energia (esetünkben pontosabban feszültség) lesz.

Hogyan zajlik a folyamat? A membrán mindkét oldalán elhelyeznek egy gázáteresztő réteget – ez a legtöbbször szénpapír –, illetve szintén mindkét oldalát katalizátorral vonják be. A hidrogént és az oxigént (amely a levegőből származik) a membrán két ellentétes oldalán vezetik a cellába. A hidrogénből keletkező hidrogén-ionok áthaladva a membránon, annak másik oldalán az oxigénredukció termékével, az OH⁻-ionokkal vízzé egyesülnek, miközben a leválasztott elektron segítségével elektromos áram jön létre (2. ábra).



2. ábra: Egyszerű PEM cella működése [14]

2. Követelmények meghatározása

Fő célkitűzésünk egy innovatív felépítésű tüzelőanyag-cella köteg létrehozása volt, ami rendelkezik azokkal a kivezetésekkel, mely a fejlesztés szempontjából több fontos paraméter mérésére alkalmasak. A cellánkban használt MEA egységet az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat (ELKH) Természettudományi Kutatóközpont tervezte és kivitelezte.

A gázáramlások szempontjából is fontos elem a cellában használt bipoláris lemez, melynek első változatát szintén az ELKH biztosította. E lemezekről függ, milyen hatékonysággal, és milyen ellenállással jut a MEA egységre a levegő és a hidrogén. Így kutatásunk egyik fő iránya a bipoláris lemezek köré összpontosult.

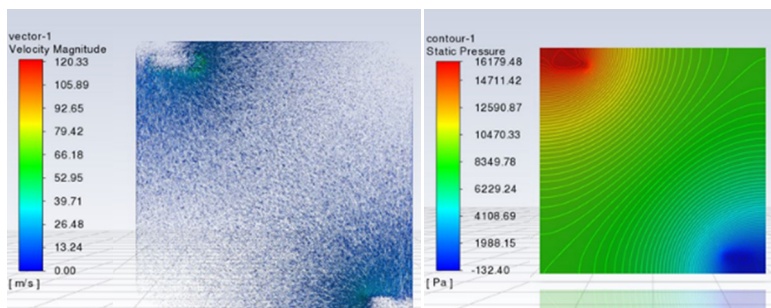
3. Konstrukciós tervezés

A PEM cellák tervezésekor elsődleges szempont, hogy a többszöri, gyors be- és kikapcsolásokat, valamint a különböző teljesítmény ingadozásokat egyre jobban, egyre kisebb degradáció mellett tudják biztosítani, melyben a platina katalizátor segít. Sok fejlesztés tárgyát képezi a nemesfém minél kisebb mennyiségű felhasználása, hogy a cellák egyre gazdaságosabbá és versenyképesebbé váljanak. A PEM típusú cellák rendelkeznek továbbá olyan hátrányokkal is, amelyek még megoldásra várnak. A használt katalizátorok például igen érzékenyek bizonyos szennyeződésekre (pl. CO), aminek következtében nagyon tiszta levegő és hidrogén szükséges a membrán számára. A levegőt ezért speciális katalizátorral kell megszűrni, a tiszta hidrogén előállítása pedig költséges. A másik probléma a membrán ideális nedvességének biztosítása, hogy az elektrolit (a membrán) károsodása ne legyen túl nagy, a cella teljesítménye ne csökkenjen túl nagy mértékben a várható élettartam során. Ezeket a cella tulajdonságokat a fejlesztés során vizsgálni szükséges különböző, üzemi körülmények között nem ellenőrzött paraméterek mérésével. Munkánk egy része is ezen módszerek kidolgozására irányul.

A MEA egység 16 cm²-es, 40x40 mm befoglaló méretű. A bipoláris lemez gépészeti szempontból fontos eleme egy tüzelőanyag-cellának, jó elektromos vezetőképességgel



3. ábra: A bipoláris lemez kialakítási koncepciójának fejlődési szakaszai



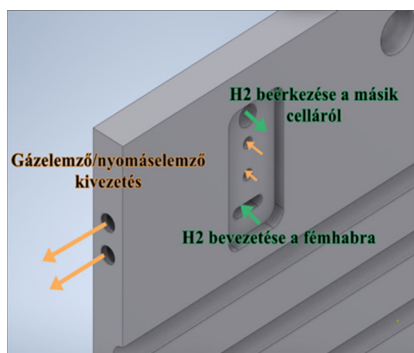
4. ábra: a) H₂ molekulák sebességvektorai [m/s],
b) a statikus nyomás kontúrképe [Pa]

és korrózióállósággal kell rendelkezzen, mert a cellán belüli közeg 2-3 pH értékű, azaz erősen savas kémhatású. A lemez anyagát tekintve mindenféleképpen valamilyen korrózióálló acélból kell gyártani. A hidrogén a periódusos rendszer legkönnyebb eleme, rendkívül kis réseken is képes elszökni, így a cella megfelelő tömítettsége kritikus. A bipoláris lemezek fő funkciója a MEA egységre történő gázvezetés, ugyanakkor elvárt a jó vezetőképesség, a jó hővezetés. Az alacsony gyártási költségek és az egyszerű cellaösszeszerelés miatt fontos a viszonylag egyszerűre tervezett geometria.

Fejlesztésünk fő iránya a gázáramlások optimalizálása a cellán belül, így kidolgoztunk egy bipoláris lemez kialakítást, melyet a 3. ábrán szemléltetünk. Az eddigi PEM tüzelőanyag-cella csatornás gázvezetése helyett, egy egyedi áramlási mezővel valósítottuk meg a gázok MEA-ra vezetését.

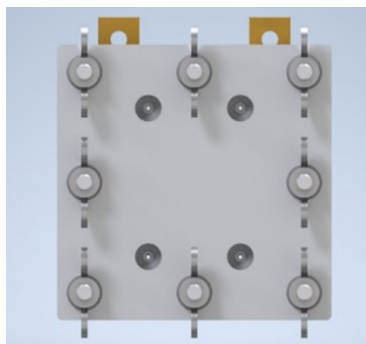
A tervezés során CFD (Computational Fluid Dynamics) szimulációt is készítettünk a várható molekula mozgásokról az egyedi közegen (4. ábra). CFD segítségével végeztük el a numerikus áramlástan modellezést. Eredményként kapott várható sebességvektorok a cellán belüli gázáramlások irányait, a statikus nyomásmező pedig a gázok eloszlását mutatja meg. Az ábra alapján a belépés és kilépés környékén magas, illetve alacsony az eloszlás, ami elfogadható analóg folyamatok esetén, amennyiben az eltérés egy tartományban marad. A saját vízió szerint kialakított cellánkban a nyomásmező alapján a gázeloszlást finomítani kell a jövőben.

A bipoláris lemez konstrukció során nagy hangsúlyt kapott a tömítések megfelelő illeszkedése a hornyokba, illetve az összes, a mérésekhez elengedhetetlen furat és egyéb kivezetés kialakítása (5. ábra).



5. ábra: A gázelemző/nyomáselemző kivezetésének szemléltető ábrája

A cella mérésének kivitelezéséhez szükség van egy áramszedőre. Mivel méréseink során végig egycellás kivitelezéssel dolgoztunk, az áramszedőt mindegyik bipoláris lemez külső oldalán kellett elhelyezni, melyhez a jó elektromos vezetés miatt rézet használtunk. Az áramszedő és a véglemez között elektromos szigetelésre volt szükség, megakadályozva ezzel az áramszedő és a véglemez közvetlen érintkezéséből keletkező rendszer-zárlatot. Az összeszereléshez szükségünk volt továbbá egy-egy véglemezre is, a reagens és oxidálószer be- és elvezetésének csatlakoztatásához, bipoláris lemezekbe továbbításához, illetve a lemezek megfelelő mechanikai rögzítéséhez. A megfelelő tömítettséget Viton/NBR70 anyagú tömítőgyűrűkkel értük el. A konstrukciós tervezési szakaszt követően létrehoztunk egy 3D renderelt modellt (6. ábra) és összeállítottuk az alkatrészlistát.



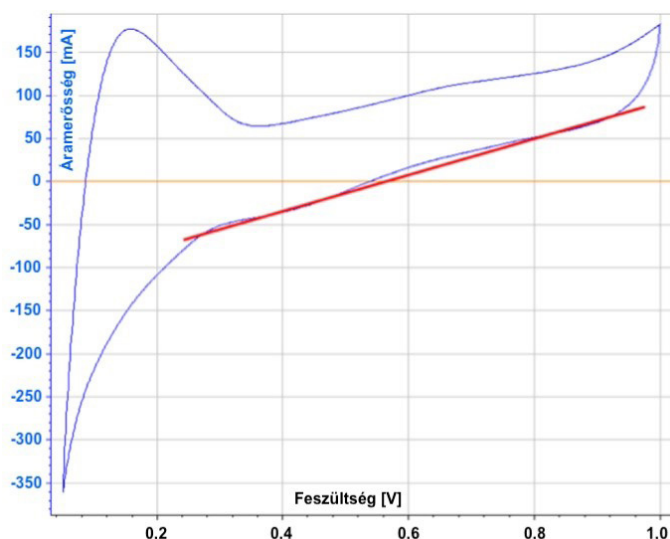
6. ábra: 3D renderelt kép a celláról előnézetben

4. Mérés

A cella gyártását követően az ELKH TTK segítségével egy tüzelőanyag-cella mérőberendezésen is megvizsgáltuk, hogy az általunk vizionált újszerű megközelítés milyen eredményeket szolgáltat.

Első körben mérésenként ciklikus voltammetriát hajtottunk végre, mely során a feszültséget ciklikusan változtattuk (50 - 1000 mV között fel és leterheléssel), és közben mértük az áramerősséget. E mérés kivitelezése után választ kaptunk arra, hogy a cella működik, így a polarizációs görbe felvétele következett.

Az első mérések során a cella feszültségének 0,8 V értékre emelése közben sajnos a rendszer hőmérséklet és nyomás növekedése nem megfelelően alakult, így a



7. ábra: A celláról felvett ciklikus voltammogram

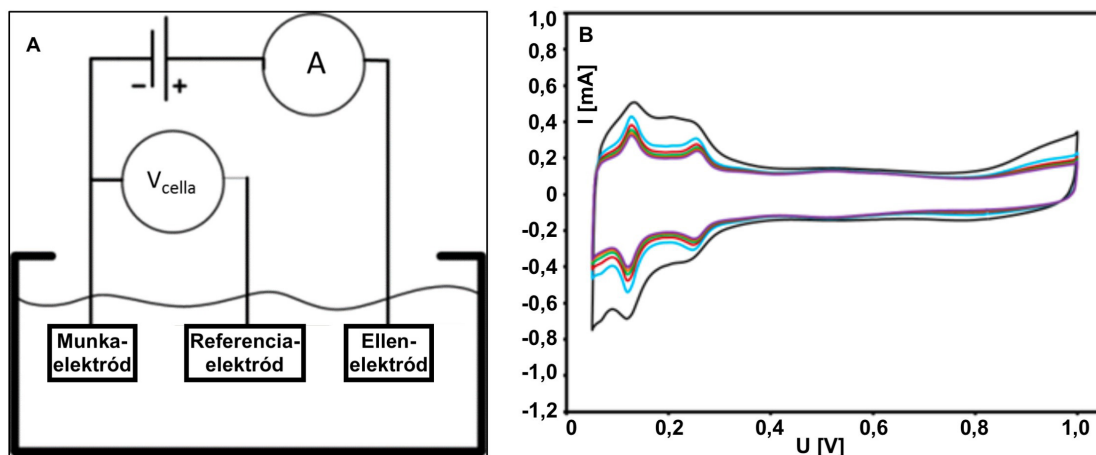
kísérletet módosítva hajtottuk végre, a leadott feszültséget 0,6 V értéken tartottuk. Ezt az utólagos vizsgálatok alapján meghatározott tömítetlenség okozta.

A módosítások után sikeresen meg tudtuk mérni a cella polarizációs görbét (7. ábra), és az eredmény bizonyította az új áramlási mező létjogosultságát.

A voltammetria (voltammogram) felvételének elvégzése alapvető minden új cella mérése során. Ezt elsőként szükséges elvégezni még az új cella aktiválása előtt. Amennyiben sikeres, akkor a cella feszültséget szolgáltat, azaz elektromosan terhelhető. A voltammetria esetén a 8. ábra szerint történik a mérés, viszont a mi mérésünk során nem három elektródos rendszert használtunk, hanem a tüzelőanyagcelláról közvetlenül vettük fel a ciklikus voltammogramot. Esetünkben a mérés és vele együtt az eredmény is módosult, mivel az anódra áramlott a H₂, ez lett a referencia és az ellenelektrod is egyben. A katódra inert gázt (nitrogén) áramoltattunk és ez lett a munkaelektrod.

Összehasonlítva a három elektródos rendszeren felvett voltammogramokat a tüzelőanyagcellán mérttel, két fő különbség jön ki. Az egyik az áramerősségek nagyságrendje (a tervezett cellán körülbelül 3 nagyságrenddel nagyobb áramerősségeket mérünk), ami a jóval nagyobb méretű elektródoknak köszönhető (0,0707-16 cm²). A másik fő különbség, hogy a cellán mért voltammogram alapvonala nem vízszintes, hanem egy pozitív meredekségű egyenes. Ez abból adódik, hogy a 3 elektródos rendszer ellenállása elhanyagolható, míg a tüzelőanyag-cellában a nagy méretű elektródok és bipoláris lemezek miatt az ellenállással is számolni kell. A voltammogram középső szakaszára illeszthető vonal (7. ábra piros vonal) meredeksége arányos a cella ellenállásával.

A tényleges teljesítménymérés, azaz a polarizációs görbe felvétele előtt minden új cellát aktiválni kell, mert így távolíthatók el azok a szennyeződések, amelyek a szerelés, előállítás során a MEA-ba kerültek. Továbbá segíti a Nafion hidratációját és a reakciók könnyebb katalizátorra jutását, ugyanis a Nafion csak hidratált állapotban válik igazán jó protonvezetővé. Az aktiválási folyamat legfeljebb



8. ábra: Háromelektrodes elektrokémiai cella
a) sematikus ábrája, b) mért ciklikus voltammogramja (1000-50 mV-ig, 100 mV/s mintavétellel)

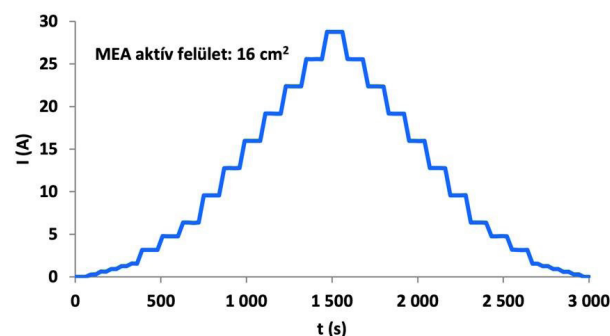
6 órát vesz igénybe. Nincs egzakt értéke, mivel csak akkor állítható le, amikor az áramerősség már nem változik. Jelen cella esetében az aktiválás 40 percig tartott, a feszültséget pedig 0,4 V-on tartottuk.

Aktiválást követően felvettük a tüzelőanyag-cella teljesítmény görbét, ezt polarizációs görbének, PolCurve-nek vagy áram feszültség (IV vagy UC) görbének hívjuk. A PolCurve három fő részt tartalmaz: 1) magas potenciálnál (800 mV fölött) egy logaritmikus feszültségesés van, amit az oxigén csökkenése miatti reakció okoz (ORR - Oxygen Reduction Reaction); 2) ezt egy lineáris rész követi, ahol a potenciál általában 800 mV és 600 mV között van, itt a csökkenést javarészt az Ohmos veszteségek okozzák; 3) alacsony potenciál esetén, különösen 500 mV alatt egy exponenciális feszültségesés történik, ezt a reagens tömegáram határértéke okozza.

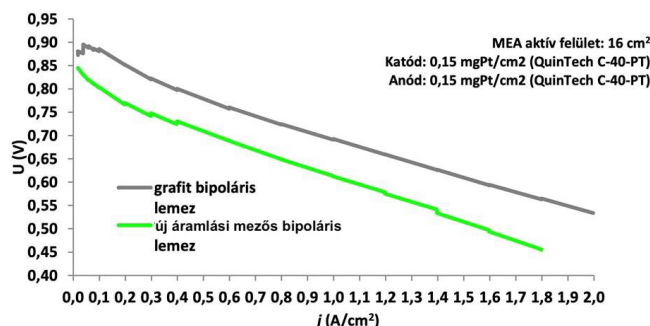
A PolCurve mérése fix működési feltételek között történik, miközben a köteg terhelése vagy árama lépésről lépésre változik alacsonyabbról a magasabb felé, majd ugyanígy vissza. A terhelés iránya (alacsonyabbról magasabb felé, vagy fordítva), időtartama és az egyes pontok mérési ideje is befolyásolja az eredményt. Az olyan teszt-pontokat, amelyek túl nagy sztöchiometrikus áramlást használnak, nagy óvatossággal kell kezelni (ilyen pl. a legnagyobb kötegáramnál 20%-kal kisebb elektromos terhelési szint), hogy a köteg károsodása és kiszáradása a lehető legkisebb legyen. Itt a lépések időtartamát 2 percre csökkentjük (1 perc stabilizációs idő + 1 perc elemzési idő). A tesztprogram részeként lépésenként állítandó az áramsűrűség.

A polarizációs görbe felvétele során az áramerősség illetve áramsűrűség függvényében mértük a cella feszültségét. Nulla értékről indítottuk, tíz másodpercenként a terhelést növeltük, egészen addig, míg a cella feszültsége 0,4 V-ra csökkent le. A kapott görbét egy a TTK-n végzett korábbi méréssel összevetettük (9., 10., 11. ábra). A két cella mindenben megegyezik (pl. MEA, mérési paraméterek) csak a bipoláris lemezek áramlási mezejének kialakítása különbözik.

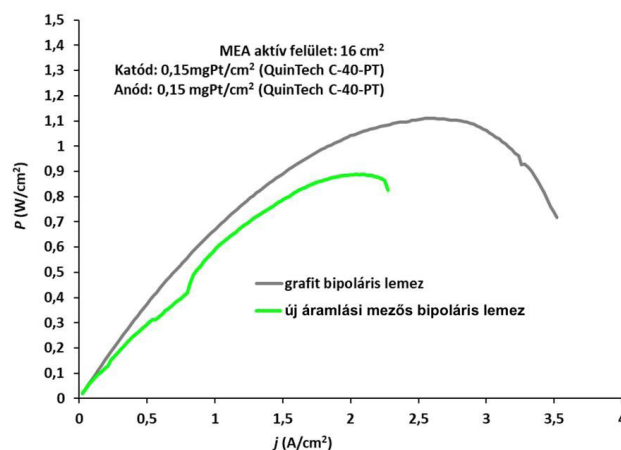
Látható, hogy a tervezett cella kialakítás teljes mértékben működőképes, hiszen nyomástartó, azaz gázszivárgás



9. ábra: A polarizációs görbe vizsgálati program



10. ábra: Korábbi TTK cellamérés és az új tervezett áramlási mezővel rendelkező cella polarizációs görbéi



11. ábra: Korábbi TTK cellamérés és az új tervezett áramlási mezővel rendelkező cella teljesítmény maximumai

mentes, és lefutott rajta a polarizációs görbe felvételi mérése. A TTK korábbi mérési eredményétől elmaradnak a tervezett cella értékei, mivel azok bipoláris lemeze grafitból készült, míg az általunk tervezett cella korrózióálló acélból készített lemezzel szerelt. A két anyag elektromos vezetőképessége nagyban különbözik. Az általunk használt acéllemez $1,37 \times 10^6$ Siemens/m [12], addig a grafit megközelítőleg 3×10^5 Siemens/m [13] vezetőképességgel rendelkezik.

5. Összefoglalás

Az új vízióval kialakított koncepció sikeres az eddigi mérések alapján:

- új áramlási mező kidolgozásra és kialakításra került;
- megterveztük és szimuláltuk kis cellaméretben az új áramlási mező gépészeti környezetét;
- a "deszkapéldány" elkészült bemérése megtörtént. Az eredmények pedig kijelölték a továbblépés irányát.

Fontos, hogy a laborméretű cellák helyett ipari alkalmazásoknak megfelelő cellaméreteket is ellenőrizzük a vízionált koncepció életképességét.

Irodalomjegyzék

- [1] Székely Sipos Sándor Zoltán: Agile ésszerűen, <https://slidetodoc.com/agile-sszeren-szekely-sipos-sndor-zolta-tartalom-a/> (Megtekintés dátuma: 2021.10.28.)
- [2] Számolás alapjait képző képletek, <https://www.cfd-online.com/Forums/fluently/46960-viscous-resistance-coefficients-porous-medium.html> (Megtekintés dátuma: 2021.09.22.)
- [3] T. Pajkossy: Elektrodegyensúlyok és folyamatok, Emlékeztető segédanyag a Fizikai-kémia előadáshoz, MTA KK AKI (2004)
- [4] Magyar Hidrogén és Tüzelőanyag-cella Egyesület: <https://www.hfc-hungary.org/tuzeloanyag-cellak/> (Megtekintés dátuma: 2020.10.30.)
- [5] Bondor Márk – BME: Üzemanyagcellák: <http://energia.bme.hu/>

~kaszas/Energetika%20(menedzsereknek)/besz%C3%A1mol%C3%B3k/%C3%9Czemanyagcella.pptx (Megtekintés dátuma: 2020.10.24.)

- [6] Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – Stack-Test Master Document: http://stacktest.zsw-bw.de/fileadmin/stacktest/docs/Information_Material/Performance/TM_P-00_Stack-Test_Master_Document_Version_1.01_2015-10-19_clean.pdf (Megtekintés dátuma: 2020.09.18.)
- [7] Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – P01 Test Module: http://stacktest.zsw-bw.de/fileadmin/stacktest/docs/Information_Material/Performance/TMs/TM_P-01_Humidity_Sensitivity.pdf (Megtekintés dátuma: 2020.09.18.)
- [8] Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – P02 Test Module: http://stacktest.zsw-bw.de/fileadmin/stacktest/docs/Information_Material/Performance/TMs/TM_P-02_Temperature_Sensitivity.pdf (Megtekintés dátuma: 2020.09.19.)
- [9] Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – P03 Test Module: http://stacktest.zsw-bw.de/fileadmin/stacktest/docs/Information_Material/Performance/TMs/TM_P-03_Pressure_Sensitivity.pdf (Megtekintés dátuma: 2020.09.19.)
- [10] Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – P08 Test Module, Stack-Test Master Document: http://stacktest.zsw-bw.de/fileadmin/stacktest/docs/Information_Material/Performance/TMs/TM_P-08_Polarisation_Curve.pdf (Megtekintés dátuma: 2020.08.24.)
- [11] Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking – Stack-Test Master Document: http://stacktest.zsw-bw.de/fileadmin/stacktest/docs/Information_Material/Performance/TM_P-00_Stack-Test_Master_Document_Version_1.01_2015-10-19_clean.pdf (Megtekintés dátuma: 2020.08.24.)
- [12] 1.403 acél elektromos vezetőképessége: https://www.tibtech.com/conductivite.php?lang=en_US (Megtekintés dátuma: 2021.12.13.)
- [13] Grafit elektromos vezetőképessége: <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499> (Megtekintés dátuma: 2021.12.13.)
- [14] Tüzelőanyag-cella működésének bemutatása: <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/what-is-a-fuel-cell> (Megtekintés: 2022.06.20.)



ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA HIRDESSZEN NÁLUNK!



**Érje el a szakmai partnereit,
leendő ügyfeleit!**

Hirdessen

az Anyagvizsgálók Lapjával!

Lehetőséget biztosítunk

**a nyomtatott kiadványban,
honlapunkon,
vagy a közösségi médiában**

hirdetéseinek megjelenítéséhez.

Egyedi árajánlatért írjon az alábbi e-mail címre:

avilap.szerk@gmail.com

Nagyszilárdságú acéllemezek törési határ alakváltozásának vizsgálati módszerei

Investigation methods for fracture strain of high strength steel sheets

Gál Viktor^a, Lukács Zsolt^b, Kovács Péter Zoltán^c

^aBay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., tudományos munkatárs, viktor.gal2@bayzoltan.hu

^bMiskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet, egyetemi docens, zsolt.lukacs@uni-miskolc.hu

^cMiskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet, egyetemi docens, metkpcz@uni-miskolc.hu

Kulcsszavak

törési alakváltozás,
alakíthatóság,
DP acél,
nyíró próbatest,
feszültség háromtengelyűség

Absztrakt

Az elmúlt évtizedek autóiipari fejlesztéseinek köszönhetően napjainkban a nagyszilárdságú acéllemezek széles palettája áll rendelkezésre. A szilárdság növekedése azonban az alakváltozó képességek csökkenésével jár együtt, ami jelentősen megnehezíti a komplex geometriájú lemezzalkatrészek gyártásának tervezését. A selejtektől és többletköltségek elkerülése érdekében a gyártók végelelemes modellező szoftvereket alkalmaznak, melyekben szükség van a vizsgált anyagok viselkedésének leírására. A rugalmas és képlékeny viselkedés leírása bevett gyakorlat, azonban az alakítás határának definiálásra jelenleg alkalmazott módszerek működőképessége megkérdőjelezhető. Cikkünkben az alakíthatóság valódi határának, tehát a törésig elviselt alakváltozásnak a vizsgálatát mutatjuk be három nagyszilárdságú Dual Phase (DP) acélra vonatkozóan.

Keywords

fracture strain,
formability,
DP steels,
shear specimen,
stress triaxiality

Abstract

Due to the recent decades' developments in the automotive industry, a wide range of high-strength steels are available nowadays. However, the increase in strength is accompanied by a decrease in formability. The lack of formability makes manufacturing sheet metal parts with complex geometries difficult. To avoid additional costs, manufacturers use finite element modeling software, which requires a description of the behavior of the tested materials. Although describing the elastic and plastic deformation is common practice, the validity of the currently used methods to determine the fracture behaviour is questionable. In this paper, the true limit of formability, i.e. the strain to fracture was investigated in case of three high-strength Dual Phase (DP) steels.

1. Bevezetés

Az elmúlt évtizedek autóiipari fejlesztéseit két tényező, a környezetvédelmi, illetve a biztonsági előírások indukálták. Környezetvédelmi szempontból fontos lenne a káros anyag kibocsátás csökkentése, mely legegyszerűbben a járművek tömegének redukálásával érhető el. Ez azonban nem tehető meg pusztán a felhasznált anyagok mennyiségének a csökkentésével, mivel a biztonsági előírások betartásához növelni kell azok szilárdságát. Ez magyarázza, hogy napjainkban a nagyszilárdságú acélok széles palettája áll a gyártók rendelkezésére [1]. A növekvő szilárdsággal azonban az alakváltozó képesség csökkenése jár együtt, ami problémát okoz az egyre bonyolódó geometriájú karosszéria elemek gyártásánál. A szerszámpróbák, illetve a kezdeti selejtektől költségét napjainkban végelelemes modellező szoftverek alkalmazásával próbálják csökkenteni, ezek használatához azonban le kell írni az anyagok viselkedését.

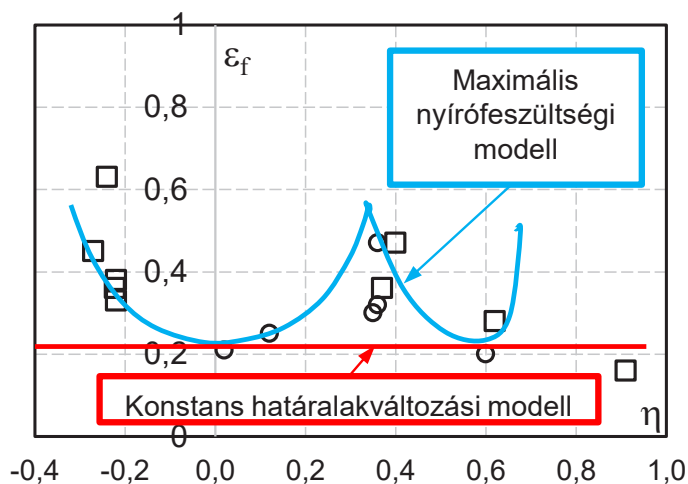
A lemezek rugalmas, illetve képlékeny viselkedésének leírására számos szabvány, illetve vizsgálati módszer áll rendelkezésre, azonban a károsodás definiálására alkalmazott megközelítéseket fenntartásokkal kell alkalmazni. Mivel az autóiipari lemezzalkatrészek esetében általában már a 30 %-os elvékonyodás sem megengedett, a károsodások előrejelzésére a kontrakciós határgörbét (Forming Limit Curve-FLC) alkalmazzák. Problémát jelent azonban, hogy a kontrakció megjelenése eltérhet [2] összetett alakváltozási útvonalak esetén, ezért az FLC a törést alul vagy túlbecsülheti. Az FLC hiányosságai miatt a kutatások egyre inkább az anyag alakíthatóságának a valódi határának [3], vagyis a törési alakváltozásnak a meghatározására és alkalmazására irányulnak.

Képlékeny alakítás hatására az anyagokban jelenlévő üregek (pl.: anyagfolytonossági hiányok) elkezdnek növekedni, új üregek keletkeznek [4], majd összenőnek, és egy bizonyos üreg-térfogathányad elérése után az anyag belső felületei elválnak egymástól, vagyis létrejön a törés. Az üregek növekedése (illetve torzulása), így az üreg-térfogathányad növekedése nem azonos egytengelyű húzó-, illetve tiszta nyíró igénybevétel esetén. A törésig elviselt alakváltozás tehát függ a feszültségállapottól, ezért ennek jellemzésére a feszültség háromtengelyűséget (η) vezeték be, amely a hidrosztatikus feszültségkomponens σ_m és az összehasonlító (von Mises) feszültségek $\bar{\sigma}$ hányadosával írható le.

Kezdetekben a törési határalakváltozások meghatározására irányuló vizsgálatok – felhasználástól függően – a feszültségteret csak kisebb tartományát fedték le. Bao és Wierzbicki [5] az elsők között voltak, akik összegyűjtötték és továbbfejlesztették a törési alakváltozások meghatározását célzó vizsgálatokat. Az általuk összeállított vizsgálatssorozat a teljes feszültségteret lefedi, azonban egyszerre tartalmaz térfogat- (1. ábra négyzettel jelölt pontok), illetve lemezalakítási (1. ábra körrel jelölt pontok) vizsgálatokat, így a repedés megjelenése nem minden esetben egyezik meg a lemezzalkatrészeknél megszokott síkból kiinduló repedéssel. Ez az eltérés megkérdőjelezhetővé teszi a károsodási határállapot alkalmazhatóságát lemezzalkatrészek gyártása esetén.

Az eltérések kiküszöbölésére napjainkban is folynak a kutatások, hogy olyan síklemezből gyártható próbatesteket és vizsgálatssorozatokat hozzanak létre, amelyek az autóiipar számára releváns tartományt megfelelően leírják.

Végelelemes modellező szoftverekben a károsodási kritériumot valamilyen – a fizikai vizsgálatokkal meghatározott



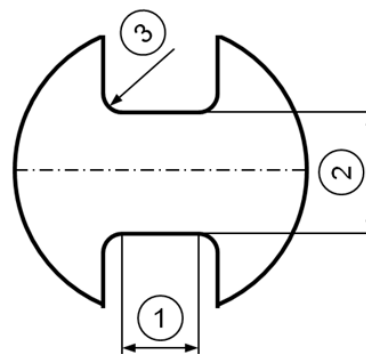
1. ábra: Törési modellek és a fizikai mérések eredményeinek kapcsolata

törési pontokat közelítő – károsodási modellel írják le. Ahogy az az 1. ábrán, a fizikai mérési pontokkal összhangban bemutatott, maximális nyírófeszültségi modell és konstans határalakváltozási modell összevetéséből is látszik, jelentős eltérés lehet az egyes törési kritériumok között [6].

Ebben a cikkben a tiszta nyírás ($\eta = 0$), illetve a kéttengelyű húzás ($\eta = 2/3$) közötti tartományban elviselt törési határalakváltozás lemez próbatestekkel történő meghatározásának lehetőségeit mutatjuk be három nagyszilárdságú Dual Phase (DP) acél (DP600, DP800, DP1000) vizsgálatán keresztül. A próbatestek bemutatása után ismertetjük a vizsgálati környezetet, valamint a törési alakváltozások meghatározásának módját. A vizsgálatok kiértékelése után elemezzük, hogy a három DP acél lemez próbatestjeivel meghatározott törési pontjaira milyen közelítés illeszkedik a legjobban.

2. A vizsgálatok leírása

Jelen cikk célja, hogy bemutassa a törési határalakváltozás vizsgálatának lehetőségeit lemez próbatest esetére a tiszta nyírás, illetve a kéttengelyű húzás közötti tartományra. Bár a tartomány egyes egzakt feszültségállapottaihoz akár több különbözően működő próbatest is rendelkezésre áll [7], még nincs olyan egységes és szabványosított vizsgálati módszer, amellyel az egész feszültségtér leírható lenne. Az eredmények összevethetősége miatt jellemzően olyan vizsgálatokat alkalmaznak, amelyek a feszültségtér minél nagyobb tartományát lefedik. Elterjedten alkalmazzák tehát az FLC felvételére használt úgynevezett Nakazima vizsgálatot [8] a törési pontok meghatározására az egy- ($\eta = 1/3$), illetve kéttengelyű ($\eta = 2/3$) húzó igénybevétel közötti tartományban. A tiszta nyírás, illetve az egytengelyű húzás közötti tartományban a törési pontok meghatározása jellemzően a tiszta nyíró próbatestek módosításával létrehozott geometriákon keresztül történik. A jelen kutatómunkában elvégzett vizsgálatokat – illetve próbatesteket – ennek megfelelően két részletben fogjuk ismertetni a következő alfejezetekben.



2. ábra: Szabványos Nakazima próbatest [8]

2.1 Nakazima vizsgálat

Az egy és kéttengelyű húzó igénybevételi tartományban a törési határalakváltozások meghatározása általánosan a Nakazima vizsgálat eredményeinek a törési alakváltozásokra vonatkozó kiterjesztésével történik. Ehhez első lépésben a szabványosított [8] vizsgálatot kell elvégezni, melynek lényege, hogy a különböző feszültségállapotokat azonos módon kialakított, de eltérő hídsszélességű próbatestekkel hozzák létre.

A 2. ábra a szabványos próbatest geometriát szemlélteti, ami alapján a vizsgálatokhoz legyártásra kerültek a próbatestek. Az ábrán az 1-gyel és 3-mal jelölt méret minden próbatest esetén 30 mm volt. A különböző feszültségállapotok a próbatest 2-vel jelölt szélességével változtathatók, ezért a vizsgálatokhoz mind a három DP acélból öt különböző hídsszélességet munkáltunk (20 mm, 40 mm, 80 mm, 125 mm, 200 mm) lézervágással az 1 mm-es táblalemezekből. Anyagminőségenként 5 különböző geometriájú próbatest került 3 ismétléssel kimunkálásra.

Mivel napjainkban nincs lehetőség lemezalkatrészek esetében közvetlenül a feszültség háromtengelyűség mérésre, bevett szokás szerint a nagyobb és kisebb főalakváltozások arányát felhasználva transzformálják az egyes pontokat a feszültségtérbe. A feszültségfüggő törési alakváltozások meghatározására tehát a próbatestek terhelése során a megszokott alakváltozások mérésére van szükség. Nakazima próbatesteknél összetett alakváltozások miatt a hagyományos nyúlásmérési módszerek nem adnak megfelelő eredményt, így optikai mérőrendszert alkalmaznak. Az optikai méréseket összefoglalóan DIC rövidítéssel jelölik, amely a Digital Image Correlation (digitális képkorrelációs eljárás) szavak kezdőbetűiből adódik ki. Az optikai mérések elvégzése a Nakazima próbatestek esetében egy négykamerás mérő- és kiértékelő rendszerrel történt, a Miskolci Egyetem Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetében. A Vialux Autogrid kamerarendszerrel történő méréshez a próbatest felületére szabályos geometriai alakzatot kell felvinni az alakváltozás méréséhez, így a vágást követően szitanyomással 2 mm osztástávolságú négyzetrács háló került a próbatest felszínére. A háló minősége alapjaiban határozza meg a mérési eredményeket, mivel az egymáshoz képest szögben álló kamerák a háló egyes csomópontjait érzékelik, és ezeknek a képfelvételeken rögzített elmozdulása alapján



3. ábra: Tönkrementelig alakított Nakazima próbatestek

származtatja az alakváltozásokat. A próbatest hálózása, valamint az optikai mérőrendszer kalibrálása után a vizsgálat a próbatest szakadásig történő terhelésével megy végbe. Ehhez első lépésben az előkészített próbatestet egy húzó és egy szorítógyűrű között kell rögzíteni úgy, hogy a lemez vizsgálati tartományon kívül eső részének az elmozdulása gátolva legyen. Ennek elérésére (híd-szélességtől függően), 250-300 kN terhelőerő szorította a lemezeket. A próbatestet, rögzítése után, annak síkjára merőlegesen, egy félgömb végződésű nyomófej terheli állandó elmozdulási sebességgel egészen a szakadásáig. A hálózott, majd elszakított próbatesteket a 3. ábra szemlélteti.

A vizsgálat eredményeit befolyásolhatja a megfelelő mintavételezési sebesség, így a szabványnak megfelelő 1 mm/perc terhelési sebesség mellé 10FPS (Frames Per Second) képrögzítési sebességet választottunk.

2.2 Nyíró igénybevételnek kitett próbatestek

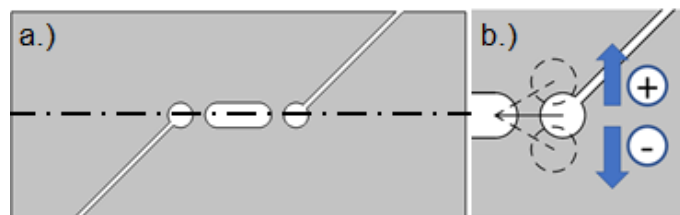
Az egy-, illetve kéttengelyű húzó igénybevétel közötti tartományt lefedő Nakazima vizsgálatok után az egytengelyű húzó-, illetve a tiszta nyírás közötti tartományban volt szükség a törési határalakváltozások meghatározására. Ez a tartomány a kisértékű, egyenes falú húzott daraboknál releváns [9], ugyanis ezeknél az alakváltozási állapotok (és így a feszültségállapotok is) a nyíró igénybevételnek felelnek meg [10]. Mivel a nyíró igénybevétel hatására létrejövő alakváltozások leírására nincs a Nakazima vizsgálatnak megfeleltethető nagy tartományt lefedő módszer, a törési alakváltozás vizsgálatára egyszerre alkalmaznak indirekt és technológiai vizsgálatokat is. Bár alkalmazás szempontjából a technológiai vizsgálatok érvényessége megkérdőjelezhetetlen, a határalakváltozások meghatározásának még mindig az egytengelyű húzással terhelt próbatestek alkalmazása a legelterjedtebb módja. Ezen próbatestek közös jellemzője, hogy a próbatest geometriai kialakítása olyan, hogy a húzó igénybevétel hatására az alakváltozó zónájának oldalai egymással párhuzamos, de ellentétes irányban mozognak el, ezzel létrehozva a nyíró igénybevételt a lemez síkjában.

A tiszta nyíró igénybevétel meghatározására rendelkezésre áll szabványos próbatest [11], azonban ennél a terhelés során fellépő oldalirányú erők miatt a nyíró zóna elfordulhat [12], melynek eredményeként nem jön létre tiszta nyíró igénybevétel. További problémát jelent, hogy a kontúrunkon fellépő húzó igénybevétel hatására egyes esetekben hamarabb keletkezhet repedés, mint a nyíró zónában, ami a nyíró határalakváltozás alulbecsléséhez vezethet. A nyíró próbatestek ezen problémáinak kiküszöbölése folyamatos kutatásokat indukál, melynek eredményeként új és bonyolult próbatest geometriák kerülnek kialakításra. Ezek gyártása költség és időigényes folyamat, emellett – mivel az optimális geometria anyagfüggő – minden vizsgált anyag esetén a geometria újraoptimalására van szükség.

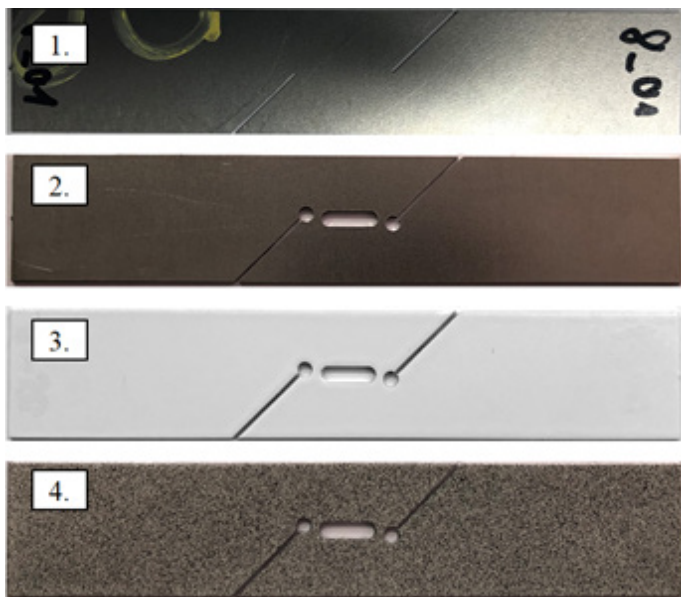
Ezeket a problémákat felismerve, korábbi kutatásaink során végeselemes modellezés segítségével kifejlesztettünk egy olyan próbatestet [13], mely egyszerűen megmunkálható geometriai elemeket tartalmaz, és optimalizálása is egy paraméter változtatásával végrehajtható. Az új nyíró próbatestet szemléletesen a 4. ábra a.) része szemlélteti.

Korábbi kutatásaink során az új próbatest geometriát a nyíró zóna szögének megváltoztatásával optimalizáltuk a jelen cikkben vizsgált három DP acélra. A vizsgálatok azt mutatták, hogy ahhoz, hogy a feszültségállapot a teljes terhelés során a tiszta nyírásnak feleljen meg a 4. ábra b.) részén feltüntetett jelölés szerint a nyíró zóna negatív irányú elforgatására van szükség. Érdekes volt továbbá megfigyelni, hogy a három különböző DP acél esetén a zóna elforgatási szöge eltér (DP600-13°, DP800-11°, DP1000-9°) [14], és a zónaszög illetve a szilárdság között fordított arányosság áll fent.

A teljes feszültségtér lefedéséhez a tiszta nyírás mellett szükség van a nyíró-szakító tartományban is törési határalakváltozások meghatározására. Ebben a tartományban a próbatesteket jellemzően a tiszta nyíró igénybevételi próbatestek módosításával hozzák létre úgy, hogy a nyíró zónának a szögét változtatják meg, ezzel módosítva a zóna viselkedését. Ezeknél a próbatesteknél – a tiszta nyíró próbatestekkel szemben – nincsenek egzakt előírások a feszültségállapotról vonatkozóan, így célunk az volt, hogy a vizsgálatok során két jól elkülöníthető pontot hozzunk létre a feszültségtér releváns tartományában. Az alakváltozó zóna terhelésének szöge, valamint a feszültség háromtengelyűség közötti összefüggés figyelembe vételével két új próbatest geometriát hoztunk létre, a 4. ábra b) részén szemléltetetteknek megfelelően a zóna pozitív



4. ábra: a) Az új próbatest geometria, b) A nyíró zóna elforgatása



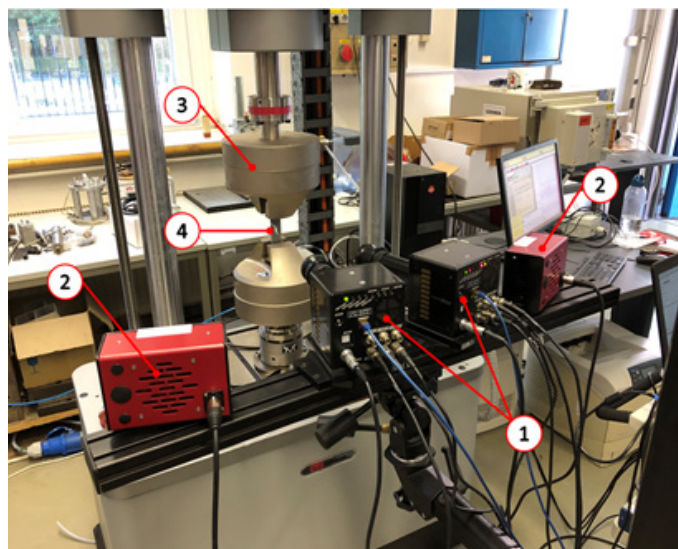
5. ábra: DP800 nyíró próbatest előkészítésének lépései

irányú, $+30^\circ$ illetve $+60^\circ$ -os elforgatásával. Mivel – ahogy azt korábban említettük – nincs előírás egzakt feszültség-állapotról vonatkozóan, mind a három acélmínőség esetén az említett két próbatest geometria került alkalmazásra.

Az 5. ábrán összefoglaltuk az új kialakítású próbatestek gyártási, illetve vizsgálat előkészítési lépéseit. Az új próbatestek geometriája két lépésben készült. Először a táblalemezből a próbatestek külső kontúrja – valamint a gyártás felgyorsítása érdekében a nyírózó zónát a kontúrral összekötő nyitás – került lézervágással kimunkálásra (5. ábra 1). A nyíró igénybevétellel terhelt próbatestek alkalmazhatóságát a nyírózó zóna kontúrjának gyártástechnológiája erősen befolyásolja [14], ennek megfelelően ezek a geometriai elemek forgácsolással készültek (5. ábra 2).

Mivel a próbatest vizsgált nyírózó zónájában összetett alakváltozások jönnek létre, jelen vizsgálatoknál is optikai mérőrendszer alkalmazására volt szükség. Ebben az esetben azonban nem volt lehetőség a Vialux rendszer használatára, ugyanis a vizsgálati zóna magassága mindössze 1,5 mm volt, ami nem tette lehetővé a már említett négyzetrács háló felvitelét.

A nyíró próbatestek optikai méréshez így egy másik optikai alakváltozás mérő rendszer, a GOM-Aramis került alkalmazásra. Ehhez azonban a próbatest további – előzőtől eltérő – előkészítésére volt szükség, ugyanis a GOM a próbatest felületén sztochasztikusan elhelyezett (általában fekete színű) festékpontokat elemez. A nagyobb kontraszt elérése érdekében bevett módszer, hogy a fekete festékpontok felvitelére előtt a próbatest felületét fehér festékkel alapozzák. A nagyobb kontrasztra azért van szükség, mert ez a rendszer a fekete festékpontokat veszi figyelembe, és a terhelés során ezeknek az elmozdulásából számítja ki automatikusan az alakváltozásokat. Az előkészítés során tehát a próbatest vizsgálni kívánt felületét először tisztítottuk, majd alapoztuk fehér festékkel (5. ábra 3). A próbatest ezután kapta meg a méréshez szükséges mintázatot (5. ábra 4).



6. ábra: Vizsgálati elrendezés a nyíró és nyíró-szakító próbatestek vizsgálatához

Mind a nyíró igénybevételi, mind a nyíró-szakító próbatesteken végzett méréseket a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Mechanikai Anyagvizsgáló Laboratóriumában végeztük. A próbatestek terhelésére egytengelyű húzó igénybevételt alkalmaztunk, amit a befogópofák állandó elmozdulási sebessége biztosított. Az előkísérletek azt mutatták, hogy a szakadás a nyíró próbatestek esetében 2 mm körüli dugattyú elmozdulásnál következik be. A kis elmozdulás mellett létrejövő nagy alakváltozást figyelembe kellett venni a megfelelő mintavételezéshez. A befogópofák relatív elmozdulási sebességét így 0,2 mm/perc-re választottuk. A kis terhelési sebesség lehetőséget adott a megfelelő mintavételezésre, melynek sebessége változott a vizsgálat során: a rugalmas alakváltozás tartományában 5 FPS-t, az egyenes nyúlásnak megfelelő tartományban 10 FPS-t, a szakadás várható bekövetkezése előtt 15 FPS-t alkalmaztunk. Az egyes mintavételezési sebességeket az előkísérletek eredményei alapján határoztuk meg. A próbatestek alakváltozásáról a képeket egy Titanar objektívvel szerelt Photron Fastcam kamera készítette. A terhelést egy Instron E10000 biaxiális elektro-dinamikus berendezés szolgáltatta.

A 6. ábra a vizsgálati elrendezést szemlélteti. Az ábrán 1. jelöli a két, szögben álló kamerát az objektívekkel, amelyek az alakváltozás közben készítették a felvételeket a próbatestről, valamint az azon levő festékpontok elmozdulásáról. Mivel az optikai mérés sarkalatos paramétere a megvilágítás, az ábrán 2-vel jelöltem a reflektorokat, melyek a kamerával párhuzamos kék fénnel világítják meg a próbatestet, így téve lehetővé a legjobb minőségű képek elkészítését. Az ábrán 3 jelöli a 16 bar-os hidraulikus befogókat, és a közéjük helyezett, 4-gyel jelölt próbatestet.

3. A törési alakváltozások meghatározása

Jelen kutatás célja a törési alakváltozások meghatározása az autóipar számára releváns feszültség háromtengelyűségi térben. Az előző fejezetben bemutatottak a Nakazima, illetve az új fejlesztésű nyíró igénybevétellel

terhelt próbatestek geometriáját és vizsgálatát. Ebben a fejezetben a vizsgálatok kiértékelésének menetét ismertetjük.

3.1 Nakazima próbatestek törési határ alakváltozása

A Nakazima próbatestek vizsgálata és általuk az FLC pontjainak meghatározása napjainkban már rutin feladatnak számít. A törési határalakváltozás meghatározása azonban két lépésben – a próbatestek és vizsgálati eredmények szabványostól eltérő kiértékelésével – történik. Első lépésben az optikai mérőrendszer segítségével meg kell határozni a szakadás előtti utolsó képen a legnagyobb mérhető a logaritmikus főalakváltozásokat ($\epsilon_{1,2,3}^{fDIC}$). Második lépésben a szakadásig terhelt próbatestek esetében kell megmérni a törési lemeztvastagságokat.

Ahhoz, hogy mérni tudjuk a lemeztvastagság megváltozását, a félgömbvégződésű bélyeggel szakadásig terhelt próbatestekből első lépésben a próbatesten megjelenő repedést is magába foglaló tartomány került kimunkálásra (7. ábra a) részén piros téglalappal jelölt tartomány). Bevett szokás szerint a kimunkált, és a törési helyet is magába foglaló tartományt ezután általános csiszolatkészítési eljárásnak megfelelően műgyantában rögzítik, majd csiszolják és polírozzák, ezután az így elkészült mintákon végzik el a törési lemeztvastagság mérését mikroszkóp segítségével. Mivel ez, az adott próbatest szám miatt (3x15db) meglehetősen hosszadalmas folyamat lett volna, a csiszolás és a vastagságmérés kivitelezésére egy mintaelőkészítő készüléket (7. ábra b) része) terveztünk és gyártottunk le, amely lehetőséget nyújt a darabok műgyantába öntés nélküli rögzítésére, csiszolására, majd ezek után a darabok törési vastagságának mérésére. A készülék működésének alapja, hogy a szakadás kimunkált környezetét az ábrán 1-el jelölt nyomólap a 2-vel jelölt gumipárnán keresztül szorítja a 3-mal jelölt gömbszeletre. A 4-el jelölt alaplappra szerelt gömbszelet sugara megegyezik a vizsgálat során

alkalmazott bélyegével, így a vizsgálat során, a szakadás időpontjának megfelelő elrendezésben van lehetőségünk méréseket végezni. Az 5-tel jelölt ellendarabok a csiszolás folyamata során biztosítják a megtámasztást, ezeket a 6-tal jelölt ellendarab szorítja az alaplaphoz. A leírt módszerrel az elszakított próbatestből kimunkált, majd csiszolt darabokról készült mikroszkópi képet, valamint a mért vastagságot a 7. ábra c) része szemlélteti. A törési lemeztvastagság meghatározására a próbatest két töretfelületén mért, egymással szemben lévő vastagságok átlagát használtuk fel.

A kezdeti és a törési lemeztvastagság ismeretében lehetőségünk nyílt a töréshez tartozó, vastagságirányú alakváltozás származtatására:

$$\epsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0}, \quad (1)$$

ahol a t_0 a lemez kiinduló vastagsága, t pedig a töret mikroszkóppal mért vastagsága. Az így kapott harmadik főalakváltozás jóval nagyobb a DIC-módszerrel mérté. A kettő közötti különbség $\Delta\epsilon_3$. A jól ismert tény figyelembevételével, miszerint a törés síkalakváltozási állapotban történik [3], térfogatállandóság feltételezésével a $\Delta\epsilon_1 = -\Delta\epsilon_3$ összefüggés adódik. A nagyobb törési főalakváltozás tehát a következő összefüggés szerint határozható meg:

$$\epsilon_1^f = \epsilon_1^{fDIC} + \Delta\epsilon_1, \quad (2)$$

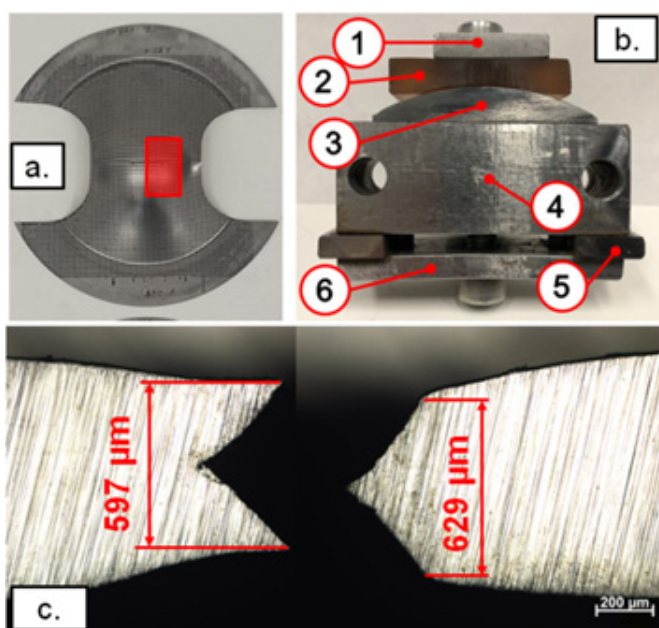
ahol ϵ_1^{fDIC} a DIC-vel meghatározott nagyobb főalakváltozás a törést megelőző utolsó képen és ϵ_1^f a nagyobbik törésig elviselt főalakváltozás. Mivel ahogy azt említettük a törés síkalakváltozási állapotban megy végbe, a kisebbik törési főalakváltozás megegyezik a DIC-vel meghatározottal, tehát $\epsilon_2^f = \epsilon_2^{fDIC}$. A törési főalakváltozások ismeretében a Nakazima próbatestekkel meghatározott törési pontokat transzformálni lehet a feszültségtérbe.

3.2 Nyíró-szakító próbatestek törési határ alakváltozása

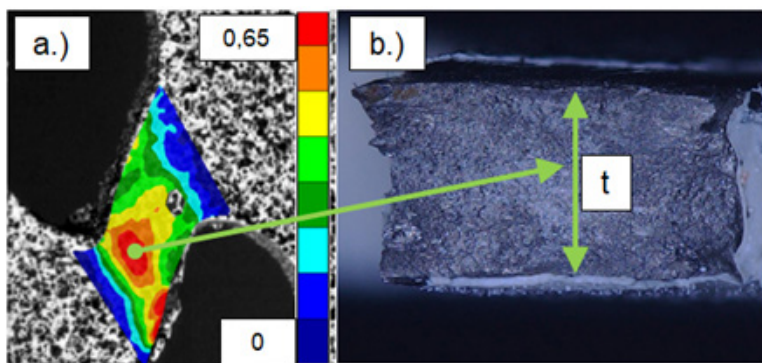
Mind a +30°-os, mind a +60°-os nyírózó zóna elforgatással meghatározott próbatestből, minden vizsgált anyagneműségről 4-4 db próbatest sorozatot készítettünk és ezt követően a 6. ábrán bemutatott vizsgálati körülmények között szakadásig alakítottuk, miközben folyamatosan rögzítettük a próbatestek nyírózó zónájának felszínén az alakváltozás eloszlását GOM-Aramis rendszerrel.

A törési határ meghatározása ezen próbatestek esetében is a már bemutatott törési lemeztvastagság módszer alkalmazásával történt. A károsodás utáni lemeztvastagság meghatározásának módját a 8. ábra szemlélteti.

Első lépésben a törés előtti utolsó képen (8. ábra a) része) a legnagyobb összehasonlító alakváltozású pontban határoztuk meg a főalakváltozások értékeit. Második lépésben a próbatest töretfelületén – a legnagyobb összehasonlító alakváltozásnak megfelelő pontban – lemértük a lemeztvastagság változását (8. ábra b) része). Ezek után az előzőekben ismertetett módszer segítségével határoztuk meg a törési főalakváltozásokat.



7. ábra: a) A kimunkált tartomány, b) Mintaelőkészítő készülék, c) Törési lemeztvastagság mérése



8. ábra: a) Törés előtti alakváltozás eloszlás, b) A törési lemezvastagság mérése

3.3 Tiszta nyíró próbatest határ alakváltozása

Tiszta nyíró próbatest esetén a lemezvastagság nem változik. Ennek megfelelően ebben az esetben a törési határ alakváltozásokat pusztán a szakadás előtti utolsó képen megfigyelt főalakváltozások adták.

4. Törési határalakváltozások a feszültségtérben

Az előző fejezetekben ismertettük a törési határalakváltozások meghatározásához szükséges próbatestek geometriáját, a vizsgálatok menetét illetve azok kiértékelését. Ebben a fejezetben az elvégzett vizsgálatokkal meghatározott eredményeket szemlélítjük. Ahogy az korábban említésre került, jelenleg még nincs módszer terhelés közben a fellépő feszültség háromtengelyűség mérésére, így bevett szokás a törési főalakváltozásokkal meghatározott pontok feszültségtérbe történő transzformálása.

A transzformációhoz első lépésben meghatároztuk az egyes próbatestek törési pontjaihoz tartozó alakváltozási irányokat (β), amit a törési főalakváltozások hányadosa ad meg a következők szerint:

$$\beta = \frac{\varepsilon_2^f}{\varepsilon_1^f} \quad (3)$$

Az alakváltozási-, illetve feszültségállapotok között kapcsolat van, így az alakváltozási irány alapján származtatható a főfeszültségek (σ_1, σ_2) aránya (α) a következő összefüggéssel:

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1+2\beta}{2+\beta} \quad (4)$$

A főfeszültségek arányának felhasználásával a feszültség háromtengelyűség (η) értékének a meghatározása a következő összefüggéssel lehetséges:

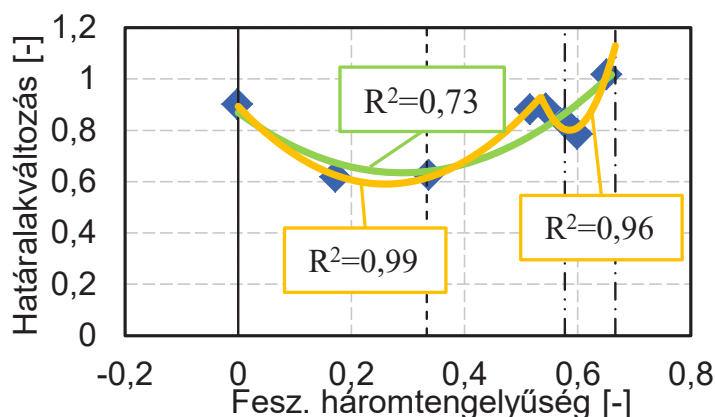
$$\eta = \frac{\alpha + 1}{3\sqrt{\alpha^2 - \alpha + 1}} \quad (5)$$

Az így származtatott feszültség háromtengelyűség függvényében, a főalakváltozások alapján számított összehasonlító alakváltozásokat DP800 acélmínőség esetére a 9. ábra kékkel jelölt pontok foglalják össze.

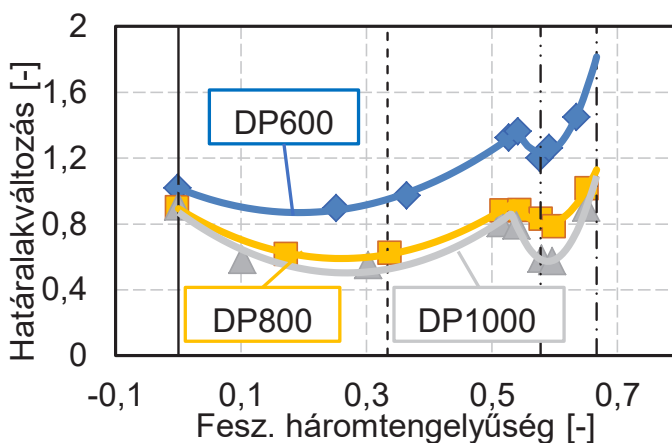
A törési pontokat a feszültségtérben – a lehetőségeket figyelembe véve – két különböző módon

közelítettük. A vizsgált pontokat először a világoszölddel jelölt másodfokú polinommal írtuk le, ebben az esetben a korrelációs együttható 0,73 értékű volt. Jobb közelítést kaptunk azonban, ha a törési pontokat két részre osztottuk és azokat két másodfokú polinommal közelítettük. Ebben az esetben az R^2 a kisebb feszültség háromtengelyűség ($\eta=0\ldots0,54$) esetén 0,99, a nagyobb háromtengelyű feszültségértékek ($\eta=0,54\ldots0,66$) esetén pedig 0,96 volt. Ezek alapján kijelenthető, hogy az általunk vizsgált összefüggések közül a törési pontokat DP800 acél esetén két egymást metsző másodfokú polinommal (dupla parabola) lehet elérni.

A három vizsgált DP acél törési pontjait transzformáltuk a feszültségtérbe, majd a DP800 acélnál bemutatott módszer alapján a törési pontokat az azokra legjobban illeszkedő dupla parabolával közelítettük. A legjobb illeszkedést mind a három vizsgált acél esetében úgy kaptuk, hogy a két polinom közül az alacsonyabb feszültség háromtengelyűség értékekhez tartozót a nyíró; $+30^\circ$; $+60^\circ$ valamint a 20 mm hídszélességű Nakazima próbatestekre, a magasabb feszültség háromtengelyűség értékekhez tartozót pedig a 40 mm; 80 mm; 125 mm, illetve 200 mm-es Nakazima próbatestek által meghatározott törési pontokra illesztettük. Az eredményeket a 10. ábra foglalja össze, ami alapján egyértelműen kijelenthető, hogy a DP acélok



9. ábra: Törési pontok és közelítési lehetőségeik a feszültségtérben



10. ábra: DP acélok törési határ alakváltozásai a feszültségtérben

szilárdságának növekedésével a törésig elviselt alakváltozás csökken.

A három vizsgált anyagra alkalmazva a megközelítést megfigyelhető, hogy a parabolák minden esetben ugyanannál a feszültség háromtengelyűség értéknél ($\eta=0,54$) metszik egymást.

A törési határgörbéket a feszültségtérben vizsgálva tehát kijelenthető, hogy DP acélok esetében a törési pontokat legjobban közelítő duplaparabola metszéspontja minden esetben ugyanazon feszültségértéknél metszi egymást, eltérés pusztán az adott feszültségértéknél elviselt törési alakváltozásban van, amely fordítottan arányos a vizsgált anyag szilárdságával.

5. Összefoglalás

Jelen cikkben három nagyszilárdságú DP acél törési alakváltozásának a meghatározási lehetőségeit vizsgáltuk két részletben. Először az alakítási határdiagram meghatározására alkalmas Nakazima vizsgálattal határoztuk meg a törési határ alakváltozásokat az egy-, illetve kéttengelyű húzó igénybevétel közötti tartományban. Második lépésként az új fejlesztésű nyíró-, illetve az ennek módosításával létrehozott nyíró-szakító próbatestek segítségével az egytengelyű húzó-, illetve a tiszta nyíró igénybevétel közötti tartományban határoztunk meg törési pontokat. A DP 800 acélon a bemutatott próbatestekkel meghatározott törési pontok feszültségtérbe történő transzformálásával vizsgáltuk az azokat legjobban közelítő összefüggéseket. Megállapítottuk, hogy a törési pontokat a legjobban két egymást metsző másodfokú polinommal lehet közelíteni. A DP600, DP800, illetve DP1000 acéloknál meghatározott törési határt leíró összefüggések összehasonlítása azt mutatta, hogy a vizsgált anyagok esetén a törési alakváltozások és a szilárdság között fordított arányosság van. Érdekes volt továbbá megfigyelni, hogy bár a különböző szilárdságú DP acélok törési alakváltozásai eltértek a szilárdság függvényében, a törési pontokat közelítő duplaparabolák minden esetben $\eta=0,54$ feszültség háromtengelyűség értéknél metszették egymást.

Irodalomjegyzék

[1] Tisza. M; Czinege. I; Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts; International Journal of Lightweight Materials and Manufacture (2018) pp.: 229-238 <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.09.001>

[2] Hora P.; Berisha B.; Hirsiger D.; Komischke T.; Schober R.; Critical aspects of the experimental and theoretical crack prediction in sheet and bulk metal forming; Forming Technology Forum 2018 pp.: 1-14.

[3] Atkins A.G.; Fracture in forming; Journal of Materials Processing Technology 56 (1996) 609-618 SSD10924-0136 (95) 01875-F C

[4] Tvergaard V., Needleman A.; Nonlocal effects on localization in a void sheet International Journal of Solids and Structures Volume 34, Issue 18, June 1997, Pages 2221-2238.

[5] Yingbin B., Wierzbicki T.; On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space; International Journal of Mechanical Sciences 46 (2004) 81-98 <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2004.02.006>

[6] Wierzbicki T., Yingbin B., Young-Woong L., Yuanli B.; Calibration and evaluation of seven fracture models; International journal of Mechanical Sciences 47 (2005) 719-743 <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2005.03.003>

[7] Takuda H., Ozawa K., Hama T., Yoshida T., Nitta J.; Forming Limit Prediction in Bore Expansion by Combination of Finite Element Simulation and Ductile Fracture Criterion Materials Transactions, Vol. 50, No. 8 (2009) pp. 1930 to 1934; <https://doi.org/10.2320/matertrans.P-M2009817>

[8] ISO/DIS 12004- Metallic Materials- Sheet and strip- Determination of forming limit curves

[9] Gorji M., Berisha B., Manopulo N., Hora P.; Effect of through thickness strain distribution on shear fracture hazard and its mitigation by using multilayer aluminum sheets; Journal of Materials Processing Technology 232 (2016) 19-33; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.014>

[10] Gorji M., Berisha B., Manopulo N., Hora P.; Experimental based crack failure criterion and its application in deep drawing operations. IDDRG 2015 conference shanghai china 2015, May 31- June 3

[11] ASTM Standard B 831-05 Standard Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products. ASTM International, West Conshohocken, PA, doi: 10.1520/B0831-05, www.astm.org

[12] Brosius A., Yin Q., Güner A., and Tekkaya A.E.; A New Shear Test for Sheet Metal Characterization; steel research int. 82 (2011) No. 4; DOI: 10.1002/srin.201000163E

[13] Gál V., Lukács Zs.; A new specimen for investigating shear fracture strain; International Deep-Drawing Research Group Conference (IDDRG 2021) 21st June - 2nd July 2021, Stuttgart, Germany; IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. (2021) 1157 012060, doi:10.1088/1757-899X/1157/1/012060E

[14] Gál V., Lukács Zs., Béres L., Kovács P. Z., Nagyszilárdságú acélok törésig elviselt nyíró alakváltozásának vizsgálata; XXX. Nemzetközi Gépészeti Konferencia - OGÉT 2022 Kolozsvár, Románia : Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) (2022) pp. 41-44., 4 p.

Kompozit filamentek 3D nyomtathatósági vizsgálata

Investigation of the 3D printability of some composite filaments

Topa Martin^a, Tóka Bence^b, Béres Levente Sándor^c, Kovács Sándor^d

^a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., junior kutató, martin.topa@bayzoltan.hu

^b Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., junior kutató, bence.toka@bayzoltan.hu

^c Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., tudományos munkatárs, levente.beres@bayzoltan.hu

^d Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., tudományos munkatárs, sandor.kovacs@bayzoltan.hu

Kulcsszavak

additív gyártás, szálhúzásos technológia (FFF), kompozitok, mechanikai tulajdonságok, gyártási paraméterek

Absztrakt

Napjainkban az additív technológiák tovább folytatták térnyerésüket a prototípusgyártás és funkcionális darabgyártás területén. Előbbi a korszerű gyártóberendezések és technológiák drasztikus fejlődésének, utóbbi pedig a korszerű – szálerősítéses – polimerek piacra lépésének köszönhetően vált népszerűvé széles körben. Az alábbiakban az egyes kompozit filamentek 3D nyomtathatósága került összehasonlításra, a technológiai sajátosságok és az egyes egységek, valamint beállítási lehetőségek egymásra gyakorolt hatásainak figyelembevételével. Végül a mechanikai tulajdonságok alapján egy rangsort állítottunk fel, mely az egyes beállításoknak a végtermékre gyakorolt hatását jellemezte.

Keywords

additive manufacturing, fused filament fabrication (FFF), composite materials, mechanical properties, manufacturing parameters

Abstract

Today, additive technologies have continued making inroads in the field of prototyping and functional parts manufacturing. The former has become popular thanks to the dramatic development of advanced manufacturing equipment and technologies, while the latter thanks to the advancement of fibre-reinforced polymers. In the followings, the printability of each composite filament is compared, taking into account the material specific characteristics and slicer setting options on each other. Finally, a ranking based on mechanical properties is provided to determine the impact of some settings on the final product.

1. Bevezetés

Az additív gyártás (Additive Manufacturing) a hagyományos (anyagleválasztó) megmunkáló eljárásokkal szemben, mint például az esztergálás, fúrás, marás a végső geometria eléréséhez nem anyagot távolít el a folyamat közben, hanem anyagréteg felhelyezéssel hozza létre, építi fel rétegről rétegre a kívánt geometriát.

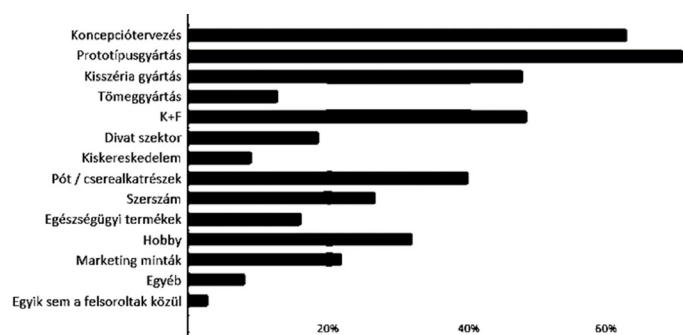
A 3D nyomtatási eljárások nem egyeznek meg teljes mértékben az additív gyártásokkal, hiszen az előbbi rész-halmaz az utóbbinak.

Az additív gyártás atyjának Charles W. Hull mondható, aki egy műanyagipari cégnél bútorelemekre UV fény segítségével helyezett fel műanyag rétegeket. Felismerte, hogy ezekből a rétegekből akár több ezret is egymásra helyezhet, és a megfelelő számítógépes paraméterek meghatározása mellett végül összefüggő térbeli alakzatot nyerhet. Szabadalmát 1986-ban jegyeztette be „Három dimenziós objektumok létrehozása sztereolitográfia által” címmel. Még ebben az évben megalapította vállalatát 3D Systems néven, mely a mai napig piacvezető, emellett az első felépítő elven működő gépet is létrehozta a 3D Systems SLA-1-et (1987) [1].

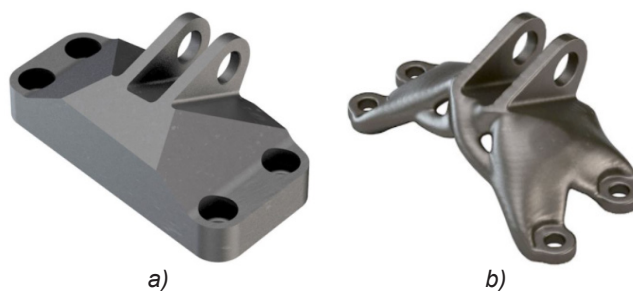
Az additív gyártás egy dinamikusan fejlődő és nagy potenciált tartalmazó gyártástechnológia. A Sculpteo statisztikai adatokkal foglalkozó cég 2019-es felmérése [2] alapján elmondható, hogy 3D nyomtatást valamilyen formában alkalmazó cégeknél még mindig a koncepciótervezés és prototípusgyártás mondható elsődleges célnak (lásd 1. ábra). Az is megfigyelhető, hogy arányosan a tömeggyártás és szerszámkészítés (Rapid Tooling) is megjelent a piacon és egyre nagyobb szerepet kap az alapanyagok fejlődésének köszönhetően.

Általánosan véve a gyártástechnológia előnyei:

- gyorsabb átfutás: a hagyományos eljárásokkal szemben gyorsabb a tervek kivitelezésében;
- alakadás nagy szabadsága: szinte bármilyen forma és elrendezés lehetséges, csekély korlátokkal;
- változtatások esetén költséghatékony módosítás: drasztikus változások esetén sincs szükség egy új és drága szerszám legyártására (pl. fröccsöntés);
- tömegcsökkentés/generatív tervezés (lásd 2. ábra): cél egy olyan geometriai kialakítás, ahol az eredeti funkciók ugyanúgy teljesülnek, viszont egy egyedi más technológiával aligha kivitelezhető formaterv mellett, melyhez rendelkezésre állnak különböző tömegoptimalizáló célszoftverek.



1. ábra: Felhasználási célok eloszlása additív gyártással készült termékek esetén [2]



2. ábra: Topológiai optimalizálás [3]
a) szubsztaktív elven kialakított geometria,
b) generatív tervezéssel előállított termék

Korlátok:

- kezdeti beruházás és fenntartás költsége, hiszen ezen gépek általában (főként ipari megmunkálásokhoz) magas üzemeltetési költséggel bírnak;
- korlátozott alapanyag paletta: az utóbbi időben a fémnyomtatás, porkohászati technológiák elterjedésének köszönhetően az alapanyagok tárháza is folyamatosan bővül. Sokféle polimer alapanyag felhasználható (PLA: politejsav, ABS: akrilnitril-butadién-sztirol Nylon), viszont amely szélsőséges esetben képes kiváltani pl. acél, alumínium elemeket (pl. PA12+CF15, mely poliamid és szénzál keveréke), kevés áll rendelkezésre, amennyiben csak polimer típusú anyagról beszélünk.
- a technológia alkalmazásához szükséges tudás hiánya: éppen emiatt kezdték el a gyártó cégek ezen tudás átadását és integrálását a tantervi hálóban, legyen szó közép- vagy felsőoktatásról.

2. Különböző nyomtatási beállítások vizsgálata

Kutatásunk következő fázisában különböző polimer kompozitokat vizsgáltunk. A hat eltérő anyagnál, különböző beállítások (eltérő kitöltési arány, eltérő nyomtatási irány és szög) mellett elemeztük a nyomtathatóságot és egytengelyű szakítóvizsgálat során a mechanikai tulajdonságokat.

2.1 Anyagok és tulajdonságaik

A következőkben ismertetésre kerülnek az általunk választott és nyomtatott alapanyagok összetétel és tulajdonság szerint rendezve. Mindegyik anyag tiszta PLA, vagy PLA-szerű és kis mennyiségben tartalmaz egyéb adalék anyagokat (pl. fa, fém), így kialakítva a végső kompozitot (keveréket). Fontos megjegyezni, hogy a táblázatos (mechanikai tulajdonságokra vonatkozó) értékek a nyers szálon végzett vizsgálatokra vonatkoznak.

• PLA Plus (Filanora - Filacorn)

Magyar gyártmányú, speciális összetételű anyag, mely jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, mint egy hagyományos PLA (lásd 1. táblázat). Ár/érték arányban a legjobb választás lehet általános igények kielégítésére.

1. táblázat: PLA Plus mechanikai tulajdonságai [4]

Y irányú nyomtatás, 0,2 rétegmagasság, 100 % kitöltés	Szabvány	
Szakítószilárdság	85 MPa	ISO 527
Young modulus	75 MPa	ISO 527
Szakadási nyúlás	3,31 %	ISO 527
Hajlítószilárdság	30 MPa	ISO 178
Útómunka	5,1 kJ/m ²	ISO 179
Sűrűség	1,24 g/cm ³	ISO 1183

• Flax PLA (Extrudr)

Lenszállal erősített PLA-szerű kompozit. A len természetben megtalálható növényi alapú szál, szakítószilárdsága elérheti az 1500 MPa-t. A természetes szál alapú kompozitoknál a legnagyobb kihívást mindig a mátrix és a hozzáadott anyag közötti megfelelő adhézió kialakítása

okozza, hiszen rossz alapanyag előkészítésnél a mechanikai tulajdonságok is csökkennek (lásd 2. táblázat), ezek valamennyire későbbi hőkezeléssel javíthatóak.

2. táblázat: Flax PLA mechanikai tulajdonságai [5]

Y irányú nyomtatás, 0,2 rétegmagasság, 100 % kitöltés	Szabvány	
Szakítószilárdság	43 MPa	ISO 527
Young modulus	3400 MPa	ISO 527
Szakadási nyúlás	3,00 %	ISO 527
Hajlítószilárdság	30 MPa	ISO 178
Sűrűség	1,45 g/cm ³	ISO 2781

• SteelFill

Korrózióálló acél részecskékkel töltött PLA-szerű kompozit. Jó felületminőséggel rendelkező, fémszerű kinézetű nagy sűrűséggel rendelkező alapanyag (lásd 3. táblázat), melynek nyomtatása nagymértékű kopásnak teszi ki és könnyen eltömítheti a fúvókát. Használata rendkívül körülményes. Nyomtatás során az acél szemcsék hajlamosak összegyűlni a fúvókában és a fűtőtest falára feltapadni. Ebben az esetben eltávolításuk nem lehetséges a gép megsértése nélkül. Ezekre mindenképp érdemes odafigyelni és elkerülni.

3. táblázat: SteelFill mechanikai tulajdonságai [6]

Y irányú nyomtatás, 0,2 rétegmagasság, 100 % kitöltés	Szabvány	
Szakítószilárdság	23 MPa	ISO 527
Young modulus	3000 MPa	ISO 527
Szakadási nyúlás	1 - 3 %	ISO 527
Hajlítószilárdság	30 MPa	ISO 178
Útómunka	10 KJ/m ²	ISO 180
Sűrűség	3,13 g/cm ³	ISO 1183

• Wood PLA

PLA alapú fa szálerősítéses kompozit (lásd 4. táblázat). Esztétikus, fa hatást kelt, sűrűsége révén könnyű. Közepesen jól nyomtatható, nagymértékű kopásnak teszi ki és könnyen tömíti el a fúvókát. Általában 70 % PLA-t és 30 % fa szál tartalmaz a keverék. Az általunk használt 60-40 arányban oszlik meg, itt hatványozottan igaz, hogy a fúvóka mérete nem lehet kisebb, mint 0,4 mm, mivel a fa szálak beragadhatnak és beéghetnek a fúvókába. Az anyag rendkívül hajlamos a szálasodásra, ezek a szálak a nyomtató többi alkatrészére idővel kiülnek, emiatt rendszeres takarítást és karbantartást igényel használata.

4. táblázat: Fa alapú PLA mechanikai tulajdonságai [7]

Y irányú nyomtatás, 0,2 rétegmagasság, 100 % kitöltés	Szabvány	
Szakítószilárdság	40 MPa	ISO 527
Young modulus	3200 MPa	ISO 527
Szakadási nyúlás	2,00 %	ISO 527
Hajlítószilárdság	43 MPa	ISO 178
Sűrűség	1,23 g/cm ³	ISO 2781

• Polylite PLA (PolyLite - Polymaker)

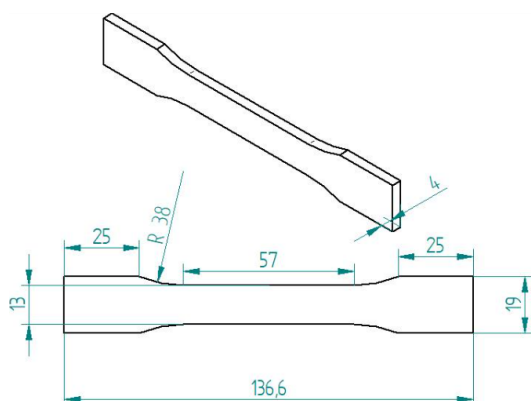
Jó minőségű, minden irányban jól nyomtatható PLA (lásd 5. táblázat), egységára valamivel drágább, mint az átlagos anyagoké.

5. táblázat: PolyLite mechanikai tulajdonságai [8]

Y irányú nyomtatás, 0,2 rétegmagasság, 100 % kitöltés		Szabvány
Szakítószilárdság	45,7 - 47,5 MPa	ISO 527
Young modulus	3151 - 3415 MPa	ISO 527
Szakadási nyúlás	1,7 - 2,1 %	ISO 527
Hajlítási szilárdság	82,2-88 MPa	ISO 178
Ütőmunka	2,68-2,72 kJ/m ²	ISO179
Sűrűség	1,13 - 1,24 g/cm ³	ISO 1183

2.2 A próbatest geometriája

A mechanikai tulajdonságok vizsgálatára laposszakító próbatesteket nyomtattunk (lásd 3. ábra), mely során változtattuk a kitöltés szintjét és a darab dőlésszögét. Később ezeket hasonlítottuk össze az egyes változatokra vonatkozóan ISO 527 szabvány szerinti szakítóvizsgálatokkal. A vizsgálatok során gyakran nem megfelelő helyen történt meg a szakadás vagy a szorítópohek összepréselték a próbatest fejrészét (nyomtatási hibák vagy nem elegendő vastagság miatt), így a mérések többszöri megismétlésre kerültek. A kapott eredményeket összevetettük a vizsgálatokkal. Amennyiben súlyos nyomtatási rendellenességet tapasztaltunk, úgy azon eredményeket nem vettük figyelembe. Az összesítés végül a szórások és átlagok figyelembevételével készült.

**3. ábra:** Lapos szakító próbatest

2.3 Nyomtatási beállítások összefoglalása

A próbatestek nyomtatása előtt szükséges a nyomtatás előtervezése, amelyet az Ultimaker Cura szoftver segítségével készítettünk el. Minden esetben a kitöltés mértékének és a nyomtatási szögnek a hatását vizsgáltuk, a további beállítások kis mértékben változtak, az adott anyagnak megfelelően. A vizsgált paraméterekre (falak száma, rétegvastagság, burkoló rétegek, hűtés) elkészítettük a próbatestek nyomtatási előterveit, mely alapján kinyomtatásra kerültek. A visszahúzás mértékét és sebességét konzekvensen állítottuk be, mivel egyik anyag sem igényelt más értékeket. A nyomtatási sebességeket viszont változtatnunk kellett. Ennek oka, hogy az FFF (szálhúzásos) technológia használatában nincs egy univerzális, általános nyomtatási sebesség.

A szeletelő program a G-kódot úgy építi fel, hogy a darabot több, különböző részre osztja és azokra generálja le a szükséges pályákat. Ezeken a pályákon nem ugyanazzal

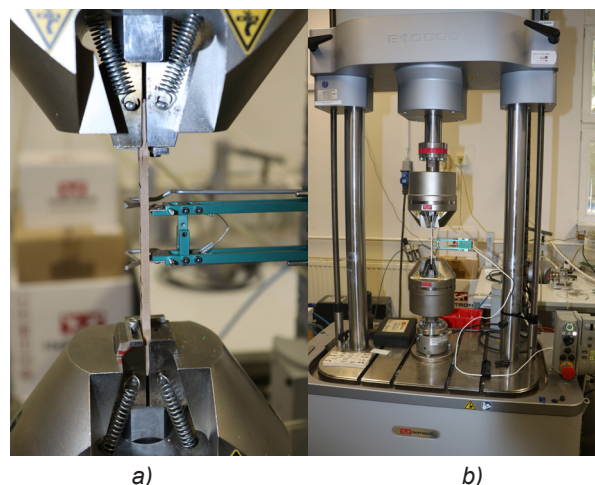
a sebességgel nyomtatunk. Az első rétegek nagyon fontosak, hiszen ezek biztosítják a megfelelő tapadást a tárgyasztalhoz, így itt a legkisebb a fűvóka sebessége (jelen esetben 10 mm/s). A falak nyomtatása is több kategóriára bonthatók. Vannak burkoló falak, melyek esztétikai szempontból fontos szerepet töltenek be, így itt a sebességet 20 mm/s-ra állítottuk. A belső falak, az x-y síkban található alsó és felső burkoló rétegek, habár nem látszódo felületet alkotnak, ők adják a mechanikai szilárdság döntő hányadát. Itt valamennyi pontatlanságot megengedhetünk, ezért a sebesség ennél a résznél 30 mm/s volt. A térkitöltési struktúra nem élvez semmilyen prioritást ezen elvek alapján, így itt 60 mm/s-mal, vagy még gyorsabban is nyomtathatunk. Fontos megjegyezni, hogy a kompozit anyagok (leginkább a fa és acéltöltetes filamentek) nem alkalmazhatóak tartósan réz fűvókával, mert alkalmazásuk abrazív tulajdonságai miatt a fűvóka intenzív kopásával jár együtt. Az általunk alkalmazott keményfém fűvóka hőátadása jelentősen alacsonyabb volt, ezért a belső terek 30-40 mm/s, a belső burkoló rétegek pedig 20 mm/s sebességgel kerültek nyomtatásra. Ez a hatás általánosságban kompenzálható nagyobb teljesítményű fűtőblokk használatával vagy jobb hőátadási tényezővel bíró fűvókával. A fűvóka és a tárgyasztal hőmérsékleteit a különböző anyagok esetén a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat: Alapanyagfüggő nyomtatási paraméterek

Anyag	Nyomtatási hőmérséklet [°C]	Asztal hőmérséklet [°C]	Kitöltés típusa	Hűtő ventilátor
PLA PLUS	225	60	Octet	100% a 3. réteg után
Steelfill	210	60	Octet	100% a 3. réteg után
Polylite	210	60	Octet	100% a 3. réteg után
Wood PLA	180	40	Octet	100% a 3. réteg után
Flax PLA	215	60	Octet	100% a 3. réteg után

3. A szakítóvizsgálat menete

A mérés során öt anyagra vonatkozóan 120 darab (minden anyagnál 3 különböző irány és 2 kitöltési arány mellett

**4. ábra:** Szakítóvizsgálat:

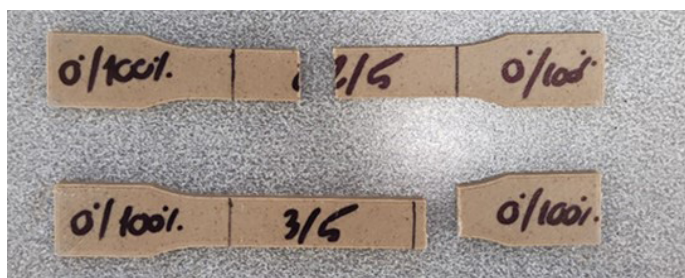
a) Instron E10000 szakítóberendezés,
b) Epsilon axiális extenzométer

4 darab került elszakításra) próbatestet vizsgáltunk meg. A szakító vizsgálatokat a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Mechanikai Anyagvizsgáló Laboratóriumában végeztük el, Instron E10000 uniaxiális szakítóberendezés használatával (lásd 4. ábra). A próbatestekre befogás után, 90 darab esetén Epsilon (3542-025M-100-LHT) típusú nyúlásmérőt helyeztünk el manuálisan, 30 darabot pedig a elmozdulás- és deformációmérésre alkalmas GOM Aramis 3D mérőberendezéssel vizsgáltuk, 50 mm-es kezdeti jeltávolsággal (lásd 5. ábra) és 2 mm/perc húzási sebességgel.



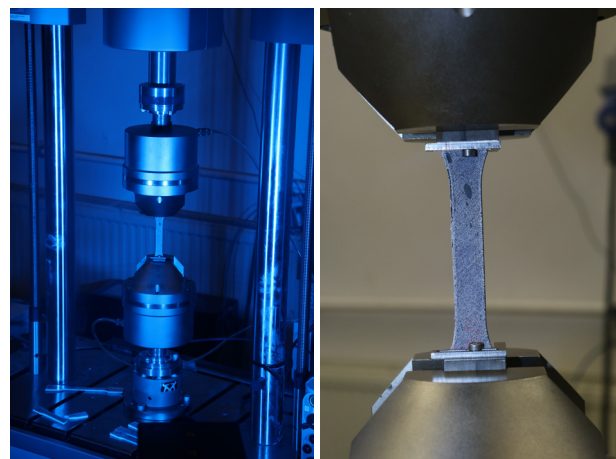
5. ábra: PLA Plus anyagú szakítópróbatetek kezdeti jeltávval ellátva

A próbatestek szakítása során több fa, illetve a fémkompozit anyagból 20%-os kitöltöttséggel készített próbatest mérése értékelhetetlen lett, mivel a befogás pillanatában a szakító próbatest fejrésze összetört. Ezen hibával rendelkező eredményeket nem vettük figyelembe. A szakítóvizsgálat során a jeltávon kívül szakadt próbatesteket (6. ábra) az eredmények kiértékelésénél – amennyiben nagy eltérést mutattak – nem vettük figyelembe.



6. ábra: Jeltávon belüli és kívüli szakadás

A GOM Aramis 3D precíziós mérőműszer (lásd 7. ábra) esetében a szakító vizsgálat annyiban tér el a hagyományos extenzométerrel végzett vizsgálattól, hogy ekkor a próbatesteteket speciális fehér festékekkel és ezt követően fekete pontokkal vonják be, melynek hatására a csatolt optikai berendezés dedikált pontokat tud felismerni. A szakítás során a 2 db nagy képkockasebességű kamera a teljes vizsgálatot rögzíti, melyet később GOM Correlate szoftver segítségével lehet kiértékelni. Egy általunk definiált hálózattal került bevonásra a darab, mellyel a cél a vizsgálatok során a 3D elmozdulások, 3D deformációk, sebességek és gyorsulások, felületi alakváltozások, digitális



7. ábra: GOM Aramis vizsgálat

képi korreláció (DIC) meghatározása volt. Esetünkben síkbeli alakváltozásokat vizsgáltunk, melyből erő-elmozdulás értékek kerültek meghatározásra.

4. Kiértékelés

A gyártási módszer tekintetében elmondható, hogy az additív gyártási mód nem irányfüggetlen. A késztermék mechanikai tulajdonságai tükrözni fogják a nyomtatási beállításokat. Jelen esetben nem vizsgáltuk a nyomtatási sebesség és a hőmérsékletek által okozott különbségeket. Ezek növelése pozitív hatással járhat a mechanikai tulajdonságokra, mivel a gyorsabb nyomtatás és a magasabb hőmérséklet jobb rétegek közötti adhéziót eredményezhet. Amennyiben a fűtőtest képes biztosítani a polimer számára a megfelelő hőátadást a darab nagyobb erőhatások elviselésére is képes lehet, de ez jelen esetben nem volt a kutatás tárgya.

A nyomtatási irányt tekintve a fektetett (0°) modellek sokkal nagyobb elmozdulásokat voltak képesek elviselni tönkremenetelig, ezt követte a 45° -os, vagyis a ferdén nyomtatott és végül az állított, vagyis a 90° -os darabok. Ez magyarázható a technológiából adódó gyengeségekből. A darabok nyúlását nagyban befolyásolja az egyes rétegek között létrehozható adhézió erőssége, illetve a rétegek érintkező felületének nagysága. A látható elmozdulások értékei tükrözik a darab rétegei között lévő érintkezési felületek mértékét.

A kitöltöttség befolyásoló szerepét tekintve fontos azt tisztáznunk, hogy a kitöltés mértéke nem azt jelenti, hogy egy 100%-os darab tömege ötszöröse lenne a 20%-os darabénak. Ez azért van, mert a kitöltöttség csak a belső térfogatra, a falakon belüli részre értendő, nem a teljes darabra. Így amennyiben célunk a darabok tömegének csökkentése és a minél kevesebb anyaghasználat, úgy figyelembe kell vennünk a megfelelő számú és méretű fal alkalmazását is. Ám ebben a munkában a fal méreteinek és rétegszámának változtatásával nem foglalkoztunk.

Ennek ismeretében kijelenthető az is, hogy a belső térfogat kitöltöttsége hatással van a darabok által elviselt maximális terhelés mértékére. A nagyobb kitöltés nagyobb terhelés elviselését teszi lehetővé (7. táblázat). Általában a teljes kitöltés 2-3-szoros szakítószilárdság

növekedést eredményezett. A 45°-os nyomtatás esetén ez a növekedés kisebb mértékű, míg az álló vagy fekvő eseteknél nagyobb. A tömeg növekedése a 20 % és 100 % -os eset között legtöbbször másfélszeres, habár – erősen alámetszett darabok esetén – ahol támaszanyagot is kell alkalmaznunk, ez az érték kevesebb lesz. Érdekes jelenség, hogy esetünkben a falak alkotta burkoló térfogat közel azonos térfogatmennyiséget foglalt el a belső hálóval. Egy nagyobb test esetén, ahol a külső rész lényegesen kevesebb térfogatot tesz ki a teljes térfogat arányában, a tömegnövekedés jóval jelentősebb lesz, míg a szakítószilárdság növekedése a belső háló sűrítésével nem lesz ilyen mértékű. Ezért nem állíthatjuk egyértelműen, hogy amennyiben a darab tömege másfélszer nagyobb, akkor a mechanikai tulajdonságok is 2-3-szor jobbak lesznek. Egyéb paraméterek változtatásával és konzekvens tervezéssel, gyorsabb nyomtatással, több fal alkalmazásával, optimális geometriával és magasabb nyomtatási hőmérsékletekkel javítható a kisebb töltöttségű darabok által elviselt erők mértéke, így anyagot spórolva meg csökkenthetőek a gyártási és átfutási idők, valamint a végső darab tömege is.

4.1 Eredmények gyártástechnológiai elemzése

A különböző nyomtatószállak vizsgálata esetén levonható az a következtetés, hogy az egyes adalékanyagok csökkentették a darab mechanikai tulajdonságait. A SteelFill vagy Wood PLA anyagok sokkal rosszabbul teljesítettek, mint a tiszta polimerek, azaz a PLA PLUS vagy Polylite. A kompozitok alkalmazása ellen szól továbbá, hogy körülményes a nyomtatásuk. Gyakori eldugulásokat okoznak, használatuk rendszeres és sűrű karbantartásokat tesz szükségessé, az erős abrazív tulajdonságok miatt nem alkalmazhatóak az egyébként jó hőátadási tulajdonságokkal rendelkező rézfűvőkák, így a gyártásuk is lassabb. Ámbár előnyeik a kiváló felületminőség, a jó esztétikai megjelenés, és azon tulajdonságuk, hogy nagyon jól tudják utánozni a fémek vagy természetes anyagok megjelenését, tapintását. Az összesített (alapanyagokat, egyes nyomtatási beállításokat, mechanikai tulajdonságokat tartalmazó) adatokat a 7. táblázat részletezi.

7. táblázat: Az egyes nyomtatási változatok mechanikai tulajdonságok szerint rendezve (csökkenő sorrendben)

Alapanyag	Nyomtatási irány	Kitöltöttség	Szakadáskor fellépő erő	Szakítószilárdság (mérnöki feszültség alapján)
PLA_PLUS	0°	100 %	2320 N	46,64 MPa
Polylite	0°	100 %	2160 N	44,18 MPa
Polylite	45°	100 %	2137 N	38,53 MPa
Polylite	90°	100 %	1892 N	35,09 MPa
Flax PLA	0°	100 %	1440 N	29,47 MPa
PLA_PLUS	45°	100 %	1384 N	26,69 MPa
PLA_PLUS	0°	20 %	1240 N	24,88 MPa
Polylite	45°	20 %	1261 N	22,49 MPa
Wood	0°	100 %	1140 N	21,90 MPa
Polylite	0°	20 %	1088 N	20,89 MPa
Flax PLA	45°	100 %	999 N	18,59 MPa
Flax PLA	0°	20 %	876 N	18,02 MPa

Steelfill	0°	100 %	872 N	17,72 MPa
Polylite	90°	20 %	942 N	17,33 MPa
PLA_PLUS	90°	100 %	919 N	16,99 MPa
Flax PLA	90°	100 %	912 N	16,90 MPa
Flax PLA	45°	20 %	751 N	13,77 MPa
PLA_PLUS	45°	20 %	693 N	12,96 MPa
Wood	0°	20 %	436 N	8,62 MPa
Wood	45°	100 %	444 N	7,78 MPa
Steelfill	90°	100 %	393 N	7,31 MPa
Wood	90°	100 %	400 N	6,88 MPa
Flax PLA	90°	20 %	338 N	6,20 MPa
Steelfill	0°	20 %	306 N	6,17 MPa
PLA_PLUS	90°	20 %	211 N	4,00 MPa
Steelfill	45°	100 %	13 N	0,24 MPa

5. Összefoglalás

Az általunk vizsgált polimerek megfelelő alkalmazásának kulcsfontosságú pillére a tervezés, a gyártás és az anyagjellemzők kapcsolatának megalkotása. Mivel a 3D nyomtatás egy új gyártási eljárás, nincs bevett gyakorlat egyik oldalról sem, viszont a megfelelő termékek megszületéséhez nem csak a gyártási paramétereknek kell megfelelniük, hanem a tervezésnél már gondolni kell a technológiára és ahhoz megfelelő geometria kialakításra. Ezen kívül az újfajta PLA polimerek tulajdonságai nagyban befolyásolni fogják mindkét folyamatot, így érdemes egy jól alkalmazható rendszer kialakítására törekedni a megfelelő anyagfelhasználás, a selejtelek minimalizálása és a technológiahelyes folyamatok érdekében.

Elsősorban fontos meghatározni a környezeti paramétereket, amelyek ideálisak a termeléshez, másodsorban az egyes darabok megalkotásához szükséges technológiai paramétereket kell megválasztani. Valamint az így kapott próbatesteken érdemes már bevett eljárások szerint lefolytatni anyagvizsgálatokat, amelyek megadják a tervezés számára fontos tulajdonságokat.

Kutatásainkat FFF nyomtatón végeztük. Részletesen összehasonlításra kerültek az elérhető mechanikai tulajdonságú PLA és PLA-hoz hasonló kompozit anyagok, különböző nyomtatási beállítások mellett. A mechanikai tulajdonságokat befolyásoló beállítások (pl. nyomtatási irány, kitöltési arány) változtatásával került legyártásra 120 db szabványos szakító próbatest.

Végül a próbatestek elszakításra és kiértékelésre kerültek egy hagyományos nyúlásmérő, valamint egy 3D-s precíziós szkennelő (GOM Aramis) adatai alapján. Ezen eredmények, valamint a megalkotott anyag és technológia vizsgáló módszer fontos alapját képezheti a későbbiekben a 3D nyomtatási eljárások termékspecifikus tanulmányozásának, illetve összehasonlításának.

Köszönetnyilvánítás

A TKP2020-NKA-18 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2020-4.1.1-TKP2020 program finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] 3D Systems, Our Story: <https://www.3dsystems.com/our-story> (letöltés dátuma: 2021.09.27.)
- [2] Sculpteo: The State of 3D Printing (2019): <https://info.sculpteo.com/the-state-of-3d-printing-report> (letöltés dátuma: 2021.09.27.)
- [3] New technology: A topológia-optimalizálás és a fémnyomtatás közös sikere a GE repülőgép-konzol pályázatán. <https://newtechnology.hu/a-topologia-optimalizalas-es-a-femnyomtatasi-kozos-sikere-a-ge-repulogep-konzol-palyazatan/> (letöltés dátuma: 2021.09.27.)
- [4] Filanora: PLA BIO plus - 3D nyomtató szál műszaki adatlap. https://www.filanora.eu/custom/filament/image/data/srattached/314bb761368336d7abbc278298537b88_PLA%20BIO%20plus%20m%20C5%B1szaki%20adatlap.pdf (letöltés dátuma: 2021.10.25.)
- [5] extrudr FLAX: Material Data Sheet. https://cdn-3d.niceshops.com/upload/file/MaterialDataSheet_FLAX.pdf (letöltés dátuma: 2021.10.25.)
- [6] colorFabb SteelFill: Material Data Sheet. https://colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS_E_ColorFabb_SteelFill.pdf (letöltés dátuma: 2021.10.25.)
- [7] extrudr WOOD: Technical Data sheet. https://www.3djake.hu/extrudr/fenyo?sai=3327&gclid=CjwKCAjwq9-mLBhB2EiwAuYdMtRFedx2vKJCADggEFKS2DB8reayom2R8G29ra_UD3Z9VpAUkYFnP0BoCdmQQAuD_BwE (letöltés dátuma: 2021.10.25.)
- [8] PolyLite PLA: Technical Data Sheet. https://c-3d.niceshops.com/upload/file/PolyLite_PLA_TDS_V3.pdf (letöltés dátuma: 2021.10.25.)



A Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete (MAE) elnökei

Presidents of the Hungarian Association for Material Testing

Tetmajer Lajos (vagy ahogyan a mérnöki tanulmányok során megismertük, Ludwig von Tetmajer) 126 éve, 1895. szeptember 9-11. között Zürichben életre hívta az Anyagvizsgálók Nemzetközi Szervezetét. A MAGYAR ANYAGVIZSGÁLÓK EGYESÜLETE másodikként, 1897. június 16-án alakult meg azzal az alapvető céllal, hogy hazánkat a nemzetközi rendezvényeken ez, és ne az osztrák-magyar egyesület képviselje. A II. Világháború végéig szervezetünk folyamatosan működött, majd az alapítás 100. évfordulóján, a Miskolctapolcán elindult kezdeményezés hosszasan vajúdást követően (Anyagvizsgálók Lapja, 2013/3-4) végül 2012-ben beérett. Az eltelt – immáron történelmi – kor nem csupán lehetőséget biztosít a Felelős Szerkesztőnek a visszatekintésre, hanem fel is szólítja arra, hogy megemlékezzünk dicső elődeinkről. Az alapvető kérdés ebben a helyzetben: hogyan, milyen módon, miképpen? A történelem megismételhetetlen. Ami elmúlt, visszahozni nem lehet, még törekedni sem szabad erre, hiszen a kudarc eleve adott. Mégis kapaszkodóként szolgálhat az a tény, hogy mindig és mindenkor voltak olyan emblematikus személyek, akik többet vállaltak a szakmáért, annak fennmaradásáért, a szakemberek összefogásáért, a tudás népszerűsítéséért.

Ezek voltak az Egyesület elnökei. Álljon itt a névsoruk:

1897-1904	Czigler Győző (műegy. tanár)
1904-1910	Nagy Dezső (műegy. tanár)
1910-1914	Czékus Aurél (min. tanácsos)
1914-1917	Rejtő Sándor (műegy. tanár)
1917-1924	Zielinski Szilárd (műegy. tanár)
1924-1927	Gállik István (alelnök, államtitkár)
1927-1930	Czakó Adolf (műegy. tanár)
1930-1934	Zorkóczy Samu (műsz. vezérig.)
1934-1939	Mihailich Győző (műegy. tanár)
1939-1942	Quirin Leo (műegy. tanár)
1942-1944	Misángyi Vilmos (műegy. tanár)
2012-2014	Gillemot László, Dr.
2014-2019	Czinege Imre (professzor emeritus)
2019 -	Biró Gyöngyvér, Dr. habil

A 14 nevet felsorakoztató névsorból lapunk korábbi számaiban már nyolc szakember életének mozzanataival találkozhattak a Tisztelt Olvasók. Most egy újabb „hidász”, Gállik István Dömötör (1866-1945) életébe, annak eredményeibe tekinthetünk be. A MAE elnöki feladatát Czakó Adolf előtt, 1924-1927 között töltötte be, mintegy „kitaposva a hidász és minisztériumi tisztviselő periódust”.

Gállik István (1924-1927)

Gállik István Dömötör is a Kherndl Antal (1842-1919) által kialakított neves „hidépítők” csapatát erősítette. 1866. március 2-án született Budán. A gimnáziumi éveit Vácon töltötte. Élete, szakmai pályafutása, eredményeinek felsorolása a források [1] alapján címszavakban a következők:

- 1888-ban szerez mérnöki oklevelet a Wartha Vince (1844-1914) rektorságával vezette Joseph Polytechnicumban (József Műegyetemen) Budapesten.
- 1888-tól a műegyetem hidépítéstani tan-székén tanársegéd.
- 1890-1892 között az Országos Vízépítési Hivatal vízrajzi osztályának mérnöke, amelynek felügyeletét a Földművelésügyi Minisztérium látja el.
- 1892-től teljesedik ki szakmai élete, amikor a Kereskedelemügyi Minisztérium hidépítési osztályára kerül. Előbb beosztott mérnök, majd 1918-tól kezdődően minisztériumi osztályfőnök, miniszteri tanácsos.
- 1925-ben nyugdíjazza.

A szakmai pályafutásának eredményei mind „akadémiai”, mind pedig „kézzelfogható termék” tekintetében igen számottevő.

Az „akadémiai” vetületet tekintve szakmai érdeklődési területeinek eredményeit zömmel a Magyar Mérnök- és Építész-Egylet Közlönyében [5], az Anyagvizsgálók



Gállik István Dömötör [1]
(1866. március 2., Buda –
1945. április 16., Budapest)

Közlönyében [4] és a hányatott sorsú [13] Technika [6] kiadványokban publikálta. E három folyóiratban összesen 42, többnyire nagyobb terjedelmű cikket jelentetett meg. Fiatal korában döntően a szerkezetek szilárdságának elméleti alapjaihoz, a rugalmasságtan témaköréhez kötődő közleményei láttak napvilágot tollából. Alapgondolata az volt, hogy a testre ható külső terhelés hatására bekövetkező alakváltozások miképpen

választhatók szét rugalmas és képlékeny tartományokra az anyagok széles skálájában. Kimutatta, hogy általában a rugalmasságtan két rugalmassági jellemzőjén, a hossz- és keresztirányú rugalmassági tényezőn, a Young-moduluson és Poisson számon nyugvó elméletében a két mennyiség között kapcsolat lehetséges. Egy 1917-ben, az Anyagvizsgálók Közleményében közölt cikkében arra a következtetésre jut, hogy a Poisson szám nem állandó, hanem a megnyúlás változásával együtt

folyamatosan változik, következésképpen csak a végtelen kis alakváltozások tartományában tekinthető állandónak a kereszt- és hosszirányú alakváltozások hányadosa. Arra mutat rá, hogy a terhelés hatására bekövetkező megnyúlások hányadosa (arányossága) helyett célszerűbb a térfogatváltozás arányosságát alapként tekinteni. Ugyancsak igen részletesen elemzi az acélok, vasanyagok szakítóvizsgálata során bekövetkező kontrakciójának információtartalmát, illetve annak felhasználhatóságát az anyagok minőségének értékelésében. Gállik Istvánnal a műegyetem mechanikai technológiai témakörében Rejtő Sándort követően Misángyi Vilmossal közösen egy olyan csoport alakul ki, amely igen nagy jelentőséget tulajdonít a törést megelőző képlékeny alakváltozásnak, annak meghatározásában, mérési technikáinak keresésében.

A Királyi József Műegyetem 50 éves jubileumi közgyűlésén 1922-ben tiszteletbeli műszaki doktori címmel [2] ismeri el alaptudományi tevékenységét az addig megjelent mintegy tíz közleménye alapján. Ugyanekkor Kandó Kálmán, Illosvay Lajos, Hauszmann Alajos, Gaál Jenő és Bodola Lajos is hasonló elismerésben részesül.

Az 1925-ös nyugdíjazását megelőzően Zielinski Szilárd elődjétől átveszi a Magyar Anyagvizsgálók Egyesületének vezetését az 1924-1927-es periódusra.

A Magyar Mérnök- és Építész-Egylet 1932-ben tiszteleti tagjává választja. Ugyancsak figyelemreméltó tevékenységet folytatott a Magyar Országos Szabványosító Bizottságokban is. Életéről, tevékenységéről és annak eredményeiről beszámol az Anyagvizsgálók Közlönye is az 1940/4. számában, amikor a Magyar Anyagvizsgálók Egyesülete választja ugyancsak tiszteleti tagjává.

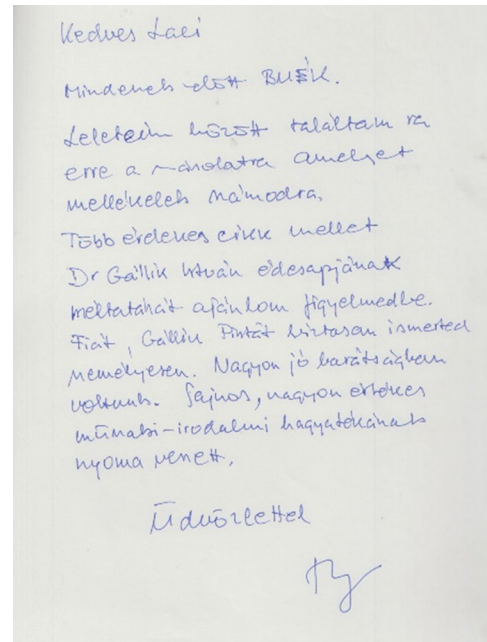
Munkássága, annak „kézzelfogható termékekben” mérhető eredményei a Ferenc József híd és az Erzsébet híd tervezési és építési munkálataiban, a Lánchíd átalakításának vezetésében tükröződnek. E tevékenységekhez kötődő történelmi érdekességek, „kis színesek” olvashatók a hivatkozásokban [9]. Miniszteri tanácsosként irányította az I. világháborúban a románok által felrobbantott Tisza-hidak helyreállítását. E tevékenységet a politika II. osztályú magyar érdemrend adományozásával ismerte el. A „kis-színesek” közül érdekességgént megjegyzendő, hogy a Ferenc József hidat 1896. október 4-én maga a császár adta át és ő ütötte be az utolsó szegecset, amely ezüsből készült F.J. monogrammal ellátva. A hidat a németek 1945. január 16-án felrobbantották. A híd 1946. augusztus 20-án nyílt meg újból immáron „Szabadság-híd” névvel. Az ezüst szegecset 1956-ban ellopták, de ugyanerre a sorsra jutott a később behelyezett alumíniumszegecs is. Egyedül a szegecsnek van meg a pesti hídfőnél a hídrő háza mellett.

Gállik István Dömötör végső nyughelye a Farkasréti temető 17/1-1-806 számú sírja, amelyről nyilvánosan hozzáférhető fénykép nem található.

Végezetül engedjék meg a Tisztelt Olvasók, hogy személyes emlékeimet is megosszam Gállik István Dömötör élete, munkássága kapcsán. Az összekötő személy Dr. Rittinger János (1939-2013) barátom, akinek életéről csak mozaikokat sikerült összerakni Fehérvári Attila

könyvében [10]. Valamikor a 2000-es évek elején Jánostól kaptam az itt látható levelet, amelyben két fontos mozzanatot említ:

- nyoma veszett Gállik István nagyon értékes műszaki-irodalmi hagyatékának,
- jó barátját, Gállik István fiát említi („akit biztosan ismeresz személyesen” megjegyzéssel).



Dr. Rittinger János levele
Gállik István műszaki-irodalmi hagyatékáról

Gállik István műszaki-irodalmi hagyatékának részlete-sebb összeállításával szerettem volna Rittinger Jánosra is emlékezni. Így időkorlátot nem ismertem a különböző forrásanyagok felkutatásában. Ha nem is érhettem el a teljességet, de úgy ítélem, hogy a mellékelt irodalomjegyzék – talán – legteljesebb, amelyet a kiváló szakember, Gállik István Dömötör az őt követő generációkra hagyott.

Ami Gállik István fiát, ifj. Gállik Istvánt illeti, valóban személyesen is megismerhettem, hiszen az 1970-es évek legelején összeállított egyetemi doktori értekezésemben [11] már tudtam hivatkozni (abban 42.-es sorszámmal szerepel) az általa összeállított 38. számú UKI kiadványra [12]. Ez volt hazánkban az első olyan könyvecske, amely a hegesztett hidak ridegtörési problémakörét tekintette át részletesen. Ebben már szerepeltek a ridegtörés elkerülésére használható különböző anyagkiválasztási rendszerek is. Ezekről Istvánnal sokat beszélgettünk munkahelyén az Ütögi Kutató Intézetben. Mindezek mellett Fehérvári Attila könyvének [10] 176-177. oldalán olvasható Rittinger János pályakezdése. Első igazi hegesztési feladata teljes mértékben a Gállik családhoz kötődött. Az Erzsébet híd tervezése és az építése anno id. Gállik Istvánhoz, a vilamos sín pályájának kialakításával kapcsolatos műszaki követelmények megfogalmazása ifj. Gállik Istvánhoz, a hegesztési technológia kidolgozása és kivitelezése pedig Rittinger Jánoshoz tartozott.

Tóth László

Irodalomjegyzék

[1] Életrajzi források:

- Új magyar életrajzi lexikon. II. kötet. p.905. Főszerkesztő: Markó László. Magyar Könyvklub. 2001.
- Magyar Elektronikus Könyvtár: Gállik István dömötör: <https://mek.oszk.hu/00300/00355/html/ABC04834/04968.htm> (Letöltve: 2022.04.05.)
- Arcanum: Magyar életrajzi lexikon: Gállik István Dömötör: <https://www.arcanum.com/hu/online-kiadvanyok/Lexikonok-magyar-eletrajzi-lexikon-7428D/g-gy-757D7/gallik-istvan-domotor-7585D/> (Letöltve: 2022.04.05.)
- Jeles napok: Gállik István Dömötör 1866: https://jelesnapok.oszk.hu/prod/unnep/gallik_istvan_domotor_szuletesnapja__1866 (Letöltve: 2022.04.05.)
- Példaképek. Magyar mérnökök: http://elsolanchid.hu/konyvek/Mernokok_01.PDF (Letöltve: 2022.04.05.)

[2] A Műegyetem tiszteletbeli doktorai. (1922-ben többek között Gállik István Dömötör) <https://docplayer.hu/36166770-A-muegyetem-tiszteletbeli-doktorai.html> (Letöltve: 2022.04.05.)

[3] Gállik István dr. h. c. ny. h. államtitkár, egyesületünk tiszteleti tagjának pályafutása és működése. Anyagvizsgálók Közlönye. 1940/4. p.156-158.

[4] Gállik István cikkek az Anyagvizsgálók Közlönyében:

- A Poisson-féle tényező és a térfogatváltozás törvénye rugalmas alakváltozásoknál. 1917. p. 97-114.
- A rugalmas feszültségváltozás törvénye. I. rész. 1918. p. 16-31.
- A rugalmas feszültségváltozás törvénye. II. rész. 1918. p. 33-50.
- Czekélius Aurél emlékezete. 1928. p. 4-9.
- A nagyobb szilárdságú szerkezeti acélok kérdésének állása Magyarországon. Az Amsterdamban (1927-ben) tartott előadás kivonata. 1928. p.19-37.
- Egyesületi Közlemények. Éves Közgyűlés 1927.03. 20. Vezette: Gállik István. 1928. p.41.
- Vas és acélanyagok nyúlásának összehasonlító vizsgálata különböző méretű próbapálcák esetében. 1930. p. 61-84.
- A krómaccélok végzett kísérletek és kapcsolatos tanulmányok. 1931. p. 29-83.
- A krómaccélok végzett újabb kísérletek. 1931. p. 161-177.
- A mértékadó főfeszültség levezetése a Mohr-féle törési elmélet alapján. 1934. p. 63-78.
- A hajlítópólya alkalmazása a hegesztés vizsgálatában. 1934. p. 79-90.
- Az 1932. évi zürichi II. nemzetközi sín-értekezlet tárgyalási anyagának ismertetése. 1934. p.229-271.
- Ferde irányú hegesztett varratok szilárdsága. 1936. p.41-50.
- Lágvyással végzett dróthúzási kísérletek. Társ szerző: Vér Tibor. 1937. p. 85-118.
- Oldal- és homlokvarratok együttműködése hegesztett kötésekben. 1938 4. szám.
- A francia hídszabályzat néhány feltűnőbb rendelkezéseinek megvilágítása. 1938 4. szám.
- A frissen hengerelt vasanyagok minőségének időszerinti javulása. 1939. p. 79-106.
- Bemetszett rudak és szögecselt kötések fáradási szilárdsága. I. rész. 1940. p.1-27.
- Bemetszett rudak és szögecselt kötések fáradási szilárdsága. II. rész. 1940. p. 33-62.

- Az acélok hegeszthetősége és az újabb nagyszilárdságú és hegeszthető mangánszilícium és mangánfoszfor Thomasacélok. 1942. p.235-262.

[5] Gállik István cikkek az Magyar Mérnök- és Építész-Egylet Közlönyében:

- A hídfők és hídoszlopok legcélszerűbb helyzetének meghatározása. 1890. 24. 1/12. p. 389-410.
- Adalékok az átlósan rácsosított tartók elméletéhez. 1891. 25/2. p.105-110.
- A fémek vizsgálata a brüsszeli kongresszuson. 1908. 42/5-6. p.127-140.
- A szakadási kontrakció jelentősége a vasanyagok minőségének megítélésében, különös tekintettel a képlékenységre. 1909. 43/9-10. p.217-225.
- Építkezések vállalatba adásának módjai, tekintettel a háború alatt és a háború után bekövetkezett rendkívüli viszonyokra. 1922. 56/48-49. p.339-345.
- A nagyobb szilárdságú szerkezeti acélok kérdésének állása Magyarországon. 1928. 62. 41/42. 285-290.p.
- Közgyűlési beszédek április 9-én (Forster Gyula, Schiffer Miksa, Schulek János, Bud János, Gállik István, Méhes Zoltán, Koiss Géza beszéde). 1932. 66/37-38. p.201-204.

[6] Gállik István cikkek a Technika kiadványban:

- Megjegyzések az alépítmények stabilitásának vizsgálatához. 1933. 5-6. p.65-67.
- Az új francia hídszabályzat néhány feltűnőbb rendelkezéseinek megvilágítása. 1938. p.234-39.
- A vasszerkezetek méretezése szempontjából fontosabb kihajlási kérdések megvilágítása I. 1938. 7. p. 227-234.
- A vasszerkezetek méretezése szempontjából fontosabb kihajlási kérdések megvilágítása II. 1938. 8. p. 306-310.
- A vasszerkezetek méretezése szempontjából fontosabb kihajlási kérdések megvilágítása III. 1938. 9. p. 330-335.
- A vasszerkezetek méretezése szempontjából fontosabb kihajlási kérdések megvilágítása IV. 1939. 3. p. 96-109.
- A vasszerkezetek méretezése szempontjából fontosabb kihajlási kérdések megvilágítása V. 1939. 7. p. 265-278.
- A vasszerkezetek méretezése szempontjából fontosabb kihajlási kérdések megvilágítása VI. 1939. 8. p. 311-325.
- Történelmi visszapillantás régebbi Duna-hidjaink építésére I. 1941. 1. p.13-24.
- Történelmi visszapillantás régebbi Duna-hidjaink építésére II. 1941. 2. p.45-46.
- Nyomott rudak méretezésére vonatkozó újabb német javaslatok és kapcsolatos megjegyzések I. 1941. 8. p.291-299.
- Nyomott rudak méretezésére vonatkozó újabb német javaslatok és kapcsolatos megjegyzések II. 1941. 9. p.338-346.
- Hegesztett kötésekkel végzett magyar és német kísérletek és a hegesztett hídszerkezetekre vonatkozó újabb német szabályzatok I. 1942. 7. p.236-244.
- Hegesztett kötésekkel végzett magyar és német kísérletek és a hegesztett hídszerkezetekre vonatkozó újabb német szabályzatok II. 1942. 8. p.292-305.
- Oldalvarratokkal végzett fásztási kísérletek. 1943. 5. p.245-247.
- [7] Gállik I.: A nehézkedés állandója. Természettudományi Közlöny. 1888. 20. 1. pótfüzet 38.p
- [8] Gállik I.: A testek szilárdságára és alakváltozására vonatkozó újabb elméletek átnézete. Budapest. Pátria. 1906.

[9] Gállik István hídépítéshez kötődő tevékenységének néhány forrása:

- Csodalatos Budapest: Szabadság híd Budapest:
<https://csodalatosbudapest.hu/latnivalok/muemlekek-szobrok/szabadsag-hid-budapest/> (Letöltve: 2022.04.05.)
- Magyar Hírlap: A híd, aminek az utolsó szegecsét Ferenc József helyezte el:
<https://www.magyarhirlap.hu/kronika/20191004-a-hid-aminek-utolso-szegecs-et-ferenc-jozsef-helyezte-el> (Letöltve: 2022.04.05.)
- 24.hu: Kényszerből volt szürke a Szabadság híd:
<https://24.hu/élet-stilus/2008/08/02/kenyszerbol lett szurke szabadsag/> (Letöltve: 2022.04.05.)

• Cultura, a kulturális magazin: A Ferenc József híd története:
<https://cultura.hu/aktualis/a-ferenc-jozsef-hid-tortenete/> (Letöltve: 2022.04.05.)

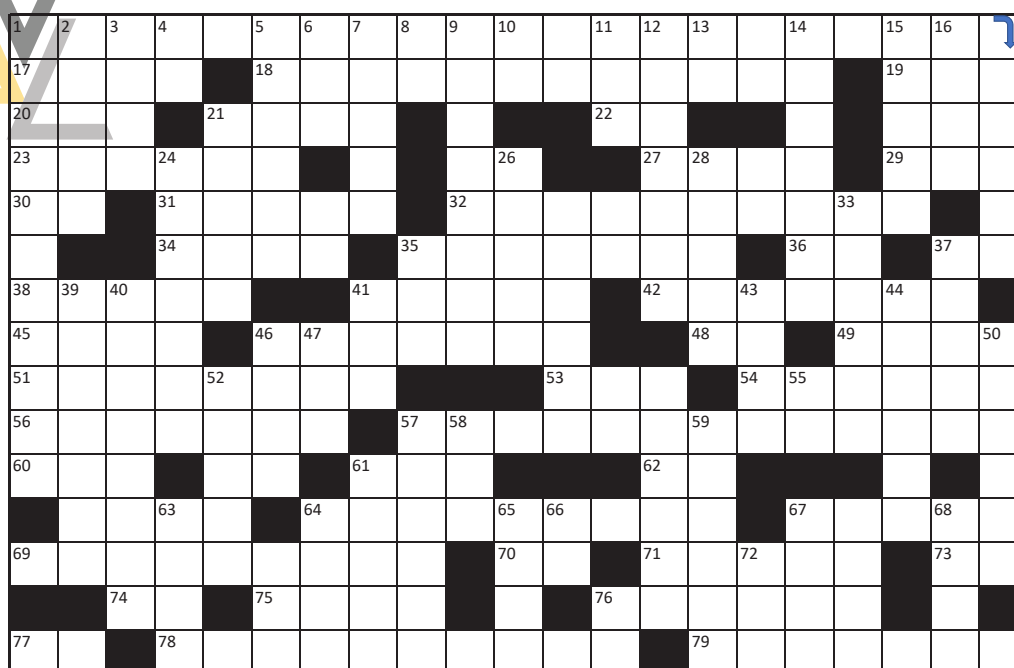
[10] Fehérvári A.: Ifjan-Éretten-Öregen. 2021. Beszélgetőtárs: Tóth L., 6. Melléklet. Rittinger János (1939-2013) életének mozaikjai. p.159-205.

[11] Tóth L.: Hegeszthető szerkezeti acélok ridegedésének vizsgálata. 1973. dr. univ. fokozat elnyerésére a Nehézipari Műszaki Egyetemen benyújtott disszertáció. 106 p. + 56 oldal melléklete.

[12] Gállik I.: Hegesztett hídszerkezetek ridegtörése és az új acélanyagok. UKI 38. sz. kiadvány, Budapest 1970.

[13] Terplán Z.: A Technikus, Technika, Műegyetemi Közlemények (kiadványok adatai, 1919-1949 között). Miskolci Egyetem, 1977. 60 p.

Anyagvizsgálók Lapja keresztrejtvény



Vízszintes

- Megfejtés I. – Egy felületi hiba kimutatására alkalmas vizsgálati eljárás
- A masina
- Rántothús kellék
- Repülőgép típus
- Örökítő anyag
- Teljesítmény egység
- Ugatni szokott
- Tejtermék
- Vonaton ül
- Angol férfinév
- Latin csont
- Valamit meg szeretne kapni
- Az Anyagvizsgálók Lapjának felelős szerkesztője
- Férfi név
- Kényelmes, jól használható
- Output egyik rövidítése
- Úriény
- Régiész szin
- Első vonal
- Idegen férfinév
- Vége az imának
- Megszégyenítettek

Függőleges

- Nem fő
- A RAKK szokásos helyszíne
- Rosálás
- Áporodott
- Nemzetiségi műsor
- Régiész feketeszén
- Megfejtés II. Ferromágneses anyagok átmágnesezésekor tapasztalható jelenség
- Orosz sport jel
- Idegen levegő
- Elér egyenmő hangzói
- Nem változik
- Régi nyelv
- Jó megjelenés
- Eső kétharmada
- Látogatás
- Nagy páratlanul
- ra párja
- Dunaújvárosi Hírportál elérhetősége, .hu
- Bakonyi síparadicsom
- Fölé
- Gabona kéve
- Egyik értékesítési hálózat átvétő pontja

Függőleges

- Fejér megyei város
- Női név
- Japán kuriózum
- Nap szélei
- Hang utánczó madár
- Napszak
- Traktor márka
- Egyik minisztérium rövidítése
- Atom építő eleme
- Nem én
- Amerikai író
- A BME Gépészműmőki karának dékánja
- Réz szélei
- Esélyes
- Kifejlett ivarérett szárnyas rovar
- Puffasztott rizs
- Fővárosa Cardiff
- Nevezetes város Olaszországban
- Függeszkedne
- Üllőbútor része
- Svájci város
- Női név
- Német érc
- Március 26-án van a névnapja
- Szisztéma
- Fával benőtt terület
- Választott románul
- Helyre tesz
- Női név
- Nem vak
- Odáig van
1948. október 7-én itt győzött Perczel Mór tábornok
- ka párja
- Tülkösszarvú párosujjú patás háziállat
- Feleség
- Von der Leyen keresztnév
- Negatív töltésű ion
- Egy jó bor városa
- Becézett Ilona
- Valós
- Szintén
- Ausztria harmadik legnépesebb városa
- Bele angolul
- Főtisztí rang rövidítve
- Égtáj

A megfejtéseket az avilap.szerk@gmail.com email címre várjuk, ahol a tárgyba írja be, hogy "Keresztrejtvény".

A helyes megfejtők között az UNIFORD Kft. által felajánlott falióra kerül kisorsolásra. Beküldési határidő: 2022.08.21.

Az eszközök dicsérete – Tisztelet Oláh Györgynek

Sokszor vitatkozunk arról, hogy mely tényezők a legfontosabbak a tudományos haladásban. Vajon az új eszközök vagy az új elméletek, koncepciók segítik-e elő hatékonyabban a paradigmaváltásokat? Ez a kérdés engem is foglalkoztatott és korábban az utóbbiakra szavaztam volna, de mára az a véleményem alakult ki, hogy az új eszközök megjelenése hozta el a legnagyobb előrelépéseket a tudományban. Kevés területen lehet ezt annyira egyértelműen tapasztalni, mint az anyagvizsgálatban. Ezért is örültem, amikor jó barátom, Tóth László felelős szerkesztő javasolta, hogy írjak a lapba Oláh György Nobel-díjas kémikusról. Oláh munkásságában az anyagvizsgálati eszközök döntő szerepet játszottak. Önmaga nem alkotott új eszközöket, de a huszadik századi tudomány fejlődését nagyban meghatározó új eszközöket sikerrel alkalmazta és új alkalmazási lehetőségeket is feltárt. Erről szól ez a rövid cikk, amelynek bevezetőjében Oláh György életéről, elsősorban pályakezdéséről is szólok, hogy láthassuk, milyen út vezetett első, döntő fontosságú felfedezéséig.

Oláh György (1927-2017) katolicizált és asszimilált zsidó családban született. Apja ügyvéd volt, a család az Operaház mellett, a Hajós utca 13-15. szám alatti ház egyik lakásában élt, jó körülmények között. Oláh a Piarista Gimnáziumban tanult. Az iskola falai között a legvadabb antiszemita időkben sem érték atrocitások, de a falakon

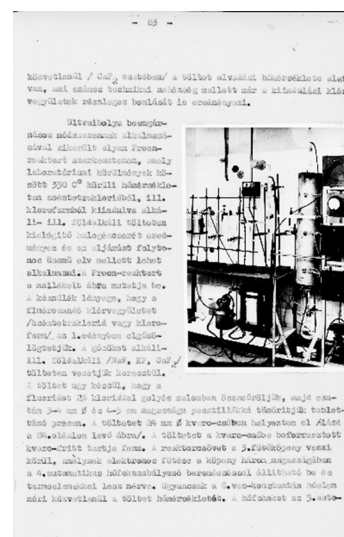


Oláh György 1995-ben a Műegyetemen (Hargittai I. felvétele)

kívül az egyre embertelenebb, ún. zsidótörvények már az életét veszélyeztették. Érettségiző évében, a háború utolsó hónapjaiban a legendás Sztrehlo Gábor evangélikus lelkész védelmében menekült meg. Oláh 3 évvel idősebb, Péter nevű bátyja nem élte túl ezt az időszakot és nem tudjuk, hogy a Budapesten tomboló nyilasterror vagy a sokakat elhurcoló szovjetek áldozata lett-e. Oláh Péter neve szerepel a Piarista Gimnázium előcsarnokában felállított emléktáblán.

Oláh Budapest felszabadulását követően folytatta és befejezte gimnáziumi tanulmányait. Középiskolásként inkább a human tárgyak érdekelték, de érettségi után gyakorlatias pályát választott és a Műegyetem vegyészmérnök hallgatója lett. Diplomájának dátuma

1949. június 24. Mentora Zemplén Géza, a szerves kémia professzora volt, aki példájával, semmint direkt beavatkozással segítette Oláh kutatói fejlődését. Oláh a Műegyetemen maradt, tanársegédi kinevezést kapott a Szerves Kémiai Intézetbe, majd hamarosan aspiránsi ösztöndíj segítette abban, hogy kutatásaira összpontosíthasson. Ez a mai doktoráns képzéshez hasonlított. A mai PhD-nek megfelelő kandidátusi fokozatért szerves fluorvegyületek előállításával és vizsgálatával foglalkozott és hazai elsőként fluorvegyületek előállítására ötletes reaktort is tervezett és épített, ez volt az ún. freonreaktor.



A gimnazista Oláh György (Oláh György szívességéből). Sztrehlo Gábor szobra, Vigh Tamás és Winkler Barnabás alkotása, 2009, az V. kerület Deák Ferenc téren (Hargittai I. felvétele). Egy oldal Oláh György kandidátusi értekezéséből az általa épített freon reaktor fényképével (az MTA Archivumból)

Értekezését 1953-ban nyújtotta be és 1954-ben védte meg. Mint ahogy a háború befejezésekor, most sem pihent meg, folytatta a munkát és már 1956-ban benyújtotta akadémiai doktori értekezését. A védésre már nem került sor, mert kitört a forradalom, majd annak vérbefojtása Oláh számára a kutatási lehetőségek végletes megromlását jelezte.

Oláh és családja elhagyta Magyarországot, és rövid angliai kitérő után Kanadában kötött ki. Egyetemi állást nem sikerült találnia és egy ipari kutatólaboratóriumban helyezkedett el. Kiválóan helytállt és megengedték neki, hogy a munkaidőn kívül, a laboratórium eszközeit használva folytassa saját kutatásait. Oláhot attól kezdve, hogy kémiával foglalkozott, legjobban a kémiai reakciók mechanizmusa érdekelte. Ha van egy kémiai reakció, ismerjük a reagáló anyagokat és ismerjük a termékeket, de az, ami közben a reakció során történik, sokáig „fekete doboz” maradhat. Viszont a kémiai reakciók mechanizmusának ismerete elősegítheti a reakciók olyan befolyásolását, ami kedvező lehet akár a kitermelés optimalizálása, akár új termékek előállítására céljából. Oláh már korán felismerte az NMR (mágneses rezonancia) spektroszkópia jelentőségét a szerves kémiai kutatásokban és az új eszközök alkalmazása iránti érzékenysége döntően befolyásolta kutatói eredményességét. Az NMR spektroszkópia alkalmazása abban az időben, az 1950-es évek végén, az 1960-as évek elején még korántsem volt elterjedt, így annak az ipari laboratóriumnak a vezetése, ahol Oláh dolgozott, sem ismerte fel ennek lehetőségét és szükségességét, míg más módszerek alkalmazása tekintetében a laboratórium korszerűen volt felszerelve.

A huszadik század kémiai kutatásaiban megjelent legfontosabb új eszközöket én a következőkben látom: diffrakciós módszerek és elsősorban a röntgen kristallográfia, kromatográfiás módszerek, spektroszkópiai módszerek, köztük a már említett NMR spektroszkópia, és a számítógépes módszerek. Igen, a modern, nagy teljesítményű számítástechnika is az új eszközök közé sorolandó. Oláh György munkásságában mind ezek az eszközök jelen voltak, mindegyiket használta és a legmagasabb szinten, ami gyakran kooperációban valósult meg az adott módszerek alkalmazásában vezető kutatókkal.



Az Oláh család 1962-ben (Oláh György szívességéből)

Az NMR spektroszkópiának Oláh kutatásaiban azért van kitüntetett szerepe, mert az 1960-as évek elején ennek a módszernek az alkalmazása tette lehetővé, hogy szinte berobbanjon a nemzetközi kutatások élvonalába. Oláh ebben az időben főleg egyetemi kapcsolatai révén küldhette el vizsgálandó mintáit NMR berendezéssel rendelkező laboratóriumokba.

Áttörést jelentő eredménye egy kémiai reakció közti termékének azonosítása volt. Ilyen jellegű kutatásokat sokan végeznek a kémiai reakciók mechanizmusának megértése céljából. De a szóban forgó eset mégsem csupán egy volt a sok között. Amikor Oláh bekapcsolódott a kutatásba, már évek óta folyt egy híres vita egy specifikus kémiai reakció mechanizmusáról, és azon belül is a reakció során keletkező rövid életű átmeneti termék szerkezetéről. A vita két nemzetközileg híres kémikus, Saul Winstein és Herbert Brown között folyt, akiknek a fellépését a különböző konferenciákon mindig nagy várakozás előzte meg. Hogy a leírásom ne legyen túlságosan elvont, meg kell neveznem a konkrét reakciót és problémát, de mivel ennek a reakciónak a megértése nem szükséges ahhoz, hogy a sztori lényegét megérthessük, az erre vonatkozó bekezdést külön helyezzük el.

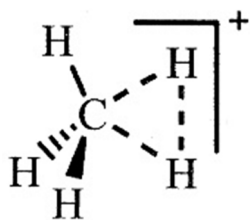


A 2-norbornilion hidas, „nem-klasszikus” szerkezete

A szóban forgó vita arról szólt, hogy a 2-norbornil észterek hidrolízise során keletkező 2-norbornilion vajon „klasszikus” vagy „nem-klasszikus” szerkezetű-e. A 2-norbornil észter exo származéka sokkal gyorsabban hidrolizál, mint az endo származék. Winstein szerint az exo esetben a nagy sebesség egy „nem-klasszikus” ion hidas szerkezetének és a C1–C6 kovalens kötés elektron delokalizációjának volt a következménye. A későbbi Nobel-díjas Brown viszont az endo származék lassú reakcióját térbeli gátlásnak tulajdonította, ami szerinte a „klasszikus” háromértékű ionok egyensúlyához vezetett.

A vitában szereplő kétféle szerkezet csupán értelmezési különbséget jelentett, mert magukat a kísérleti megfigyeléseket, a tényeket, senki sem vitatta. Mivel viszont senki sem tudta közvetlenül megfigyelni és azonosítani a reakció közti, rövid élettartamú átmeneti termékét, sokáig remény sem volt arra, hogy a vitát feloldják. Ekkor lépett színre Oláh György.

Oláh már az 1950-es évek végétől kísérletezett azzal, hogy azonosítsa a szóban forgó reakció közti termékét és ezt azzal sikerült elérnie, hogy meghosszabbította ezeknek az átmeneti termékeknek az élettartamát. Különlegesen erős savakat alkalmazott, ún. szupersavakat, amelyeket mágikus savaknak is neveznek. Úgy lehet meghatározni a szupersav fogalmát, hogy erősebb sav, mint a koncentrált kénsav. Nem Oláh fedezte fel ezeket a savakat, a szupersav név sem tőle származik, de a legfontosabb gyakorlati



A CH_5^+ ion szerkezeti modellje

alkalmazásukat ő vezette be. Amikor hasznosságuk kiderült, Oláh is felfedezett újabb szupersavakat. A szupersavak óriási többlet hidrogénion koncentrációt hoznak létre a reakcióközegben és ezzel stabilizálják az ott jelenlevő pozitív töltésű ionokat. A szóban forgó reakció közti termékét sikerült Oláhnak stabilizálnia, mintegy meghosszabbította az élettartamát és ennek eredményeként, az NMR spektrumok alapján sikerült a szerkezetét meghatározni (és kimutatni a 2-norbornilion „nem-klasszikus” hidas” szerkezetét).

Oláhnak 1962-ben volt először alkalma arra, hogy egy nagy nyilvánosságot biztosító konferencián beszámoljon erről a hosszú ideje tartó, szenvedélyes vitát eldöntő felfedezéséről. Bejelentésének nem annyira tudományos jelentősége volt, mint inkább a vitában résztvevők hiúsága szempontjából volt fontos, de ez nem csökkentette a szenzáció nagyságát. Nehezen lehetne elképzelni átütőbb hatást, mint amilyent Oláh beszámolója jelentett. Eredménye megérdemelt, de a vártól jóval nagyobb elismerést és hírnevet hozott számára. Fontos azonban azonnal hozzátenni, hogy a szupersavas stabilizáló módszerét azután az évek során továbbfejlesztette és egy teljesen új kémiát hozott létre ennek nyomán. Módszerével reakcióképesé tette az addig alig reagáló tartott szénhidrogéneket. Egy addig unalmasnak tartott területből, ami a szénhidrogén kémia volt, egy izgalmas és tele gyakorlati alkalmazhatósággal bíró területet hozott létre. Eredményei középpontjában az ún. karbokationok voltak. Ilyen karbokation a 2-norbornilion is.



Nobel-díjasok egy csoportja 2001. december 10-én a díjátadó ünnepségen. Oláh a kép felső részén középen látható. Hans Mehlin felvétele, © The Nobel Foundation

Az egyik legegyszerűbb karbokation a CH_5^+ ion. Ezt az ionot nem Oláh fedezte fel, ez már az 1950-es évek elején egy tömegspektrométeres kutatásban megtörtént, de az ötös koordinációjú szén akkor csak kuriózumnak számított. Az Oláh által teremtett kémiában ennek az ionnak értelme és szerepe lett.

Oláh hírnevét a Winstein-Brown vita eldöntése alapozta meg, de Nobel-díját 1994-ben az új kémia megteremtése hozta el. A Nobel-díj indoklása így hangzott: „a karbokation-kémia terén elért eredményeiért”. Ez elég szerényen hangzik, és realitásabb lenne úgy fogalmazni, hogy a karbokation-kémia létrehozásáért vagy megteremtéséért. Természetesen Oláh eredményei nem pusztán az NMR spektroszkópiának köszönhetők, de az ugyanúgy elengedhetetlen volt felfedezéséhez, mint Oláh György alkotó tehetsége és állhatatossága.

Hargittai István



ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA
PUBLIKÁLJON NÁLUNK!

**Írjon szakmai vagy általános
témájú cikket**

az

Anyagvizsgálók Lapjába!

Részletekért látogassza meg honlapunkat,
vagy írjon az alábbi email címek valamelyikére:

info@anyagvizsgaloklapja.hu
avilap.szerk@gmail.com

www.avilap.hu

Rovataink:

Állapottellenőrzés, élettartam gazdálkodás,
Minőségbiztosítás (minőség, megbízhatóság),
Rongcsolások / Mechanikai vizsgálatok,
Anyag. anyagszerkezet,
Hallgatók cikkei,
Hírek,
Portré,
Műföldkövek,
Fórum,
Nekrológ,
Bemutatójuk...

Egy kitüntetés margójára Czoboly Ernő, Magyar Érdemrend Tisztikeresztje, polgári tagozata 2022

On the margins of an award

Ernő Czoboly, Honorary Officer Cross of the Order of Merit (civilian) of Hungary

A hazai anyagvizsgáló szakma doyenje

„a törésmechanika szakterületének magyarországi meghonosításában betöltött kiemelkedő szerepe, valamint a fémek fáradásának és törésének nemzetközi szinten is elismert kutatójaként, illetve a Czoboly-Radon módszerkidolgozójaként elért eredményei elismeréseként dr. Czoboly Ernő, a műszaki tudomány doktora, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kara Anyagtudomány és Technológia Tanszékének címzetes egyetemi tanára részére, MAGYAR ÉRDEMREND tisztikeresztje polgári tagozata kitüntetésben részesült”

– olvasható a MAGYAR KÖZLÖNY 2022.évi, március 21.-én megjelent 54. számában¹



Czoboly Ernő a műszaki tudomány doktora, szakmánk doyenje

Mielőtt bármilyen személyes megjegyzést, méltatást tennék, engedje meg a Tisztelt Olvasó, hogy röviden, amolyan „lőgrás-szerűen”, címszavakban átfussam életének főbb mozzanatait:

- 1929. január 18. Budapest, születésének időpontja és helye;
- 1947 érettségi az Evangélikus Fasori Gimnáziumban;
- 1951 gépészmérnök, a Budapesti Műszaki Egyetem (BME);
- 1951-1961 BME Mechanikai Technológiai Tanszék tanársegéd;
- 1961-1970 a BME Mechanikai Technológiai Tanszék akadémiai státuszban tudományos munkatárs;
- 1967 a műszaki tudomány kandidátusa (MTA);
- 1968 dr. tech fokozat a BME-n;
- 1969 Imperial College (London, 6 hónapos tanulmányút);
- 1970-1989 a BME Mechanikai Technológiai Tanszék tudományos főmunkatársa;
- 1972-1973 vendégelőadó a Wisconsin Egyetemen (USA);
- 1987 címzetes docensi kinevezés a BME-n;
- 1989-1992 az MTA AEKI KFKI tudományos főmunkatársa;
- 1991 Euromérnök (FEANI);
- 1992 a műszaki tudomány doktora (MTA);
- 1992-2003 az MTA AEKI KFKI tudományos tanácsadója;
- 1992-2008 a Magyar-Koreai Műszaki Együttműködési Alapítvány főtárgya;
- 1993 címzetes egyetemi tanár a Miskolci Egyetemen;
- 2016 címzetes egyetemi tanár a BME-n.

Czoboly Ernő igen intenzív szakmai tevékenységet folytatott, alapvetően a különböző szakmai szervezetek

keretei között. Címszavakban ez a következő módon foglалható össze:

- Gépipari Tudományos Egyesület (GTE):
 - 1961 a tagság kezdete,
 - 1972-1985 a Törésmechanikai Szakcsoport vezetője,
 - 1985-1992 a Mechanikai Vizsgálatok Szakosztályának vezetője,
 - 1990-1994 az Egyesület alelnöke.
- Magyar Mérnökakadémia (MMA):
 - 1990 alapító tag,
 - 1990-1996 MMA elnökségének tagja,
 - 1996-1999 MMA kincstárnoka,
 - 1999-2010 MMA elnökségének tagja,
 - 2002-2006 MMA alelnöke.
- Európai Szerkezetintegritási Társaság (ESIS):
 - 1980-1994 Magyar Nemzeti Bizottság elnöke,
 - 1984-1992 ESIS elnökségének tagja.
- Törés Nemzetközi Konferencia (ICF):
 - 1982-1996 Magyarország szavazati jogú képviselője.
- Amerikai Anyagvizsgáló Egyesület (ASTM):
 - 1992-1998 tagság.

A folyamatos és nemzetközileg is elismert szakmai tevékenység természetesen elismerésekben is megnyilvánult. Időrendi sorrendben:

- 1965 Magyar Tudományos Akadémia elnökségének díja,
- 1976 GTE Tudományos díja,
- 1985 Pattantyús Ábrahám díj (GTE),
- 1989 Gillemot László díj,
- 2017 Magyar Anyagvizsgálók Egyesületének emlékérmé,
- 2022 Magyar Érdemrend Tisztikeresztje polgári tagozat.

¹ A köztársasági elnök 78/2022. (II.21.) KE határozata kitüntetés adományozásáról, Magyar Közlöny, 2022. évi 54. szám, 2022.03.21.
<https://magyarokozlony.hu/dokumentumok/252712beb0fdd3791ceb236bb7ab6a46cb8fe4f0/megtekintes>

Ennyit a „hivatalos” részről. Engedje meg a Tisztelt Olvasó, hogy néhány személyes pillanatot is kiemeljek hosszú idejű baráti kapcsolatunkból. A választás, válogatás meglehetősen nehéz, hiszen azonos szakmai területet művelünk, így igen sok közös élmény él, élhet mindkettőnkben. Csupán felsorolásszerűen ezek:

- Az 1968-1991-es periódusban, Magdeburgban H. Blumenauer, H. Stroppe és J. Altenbach szervezte „Verformung und Bruch” konferencia-sorozat, ahol Czoboly Ernő a „befutott”, kiváló német és angol nyelvtudású nemzetközi hírű szakemberként vehetett részt, jómagam a „kezdőket” képviseltem. A sok-sok személyes találkozás egy-egy pillanatát megörökítő fénykép egyike az 1984-ben Hajdúszoboszlón, az általam útjára indított és immáron a II. Országos Törésmechanikai Szeminárium megnyitóján készült, ahol Czoboly Ernő a GTE Törésmechanikai Szakcsoport vezetője, Terplán Zénó professzor a GTE elnöke és Romvári Pál professzor, mint „házigazda” ül egymás mellett.



II. Országos Törésmechanikai Szeminárium, 1984. október 29. - november 1., Hajdúszoboszló, Romvári Pál, Terplán Zénó, Czoboly Ernő

- A KGST együttműködés keretében a legkülönbözőbb terhelési körülmények között üzemelő szerkezetek megbízhatóságának, integritásának értékelésében figyelembe vehető „jó-gyakorlatok” feltérképezésével és kialakításával foglalkozó csapatok tagjai voltunk. Ennek egyik momentumának illusztrálására álljon itt egy olyan közös fénykép, amely 1990-ben „Rosztov-na-Donu”-ban készült.



Rosztov-na-Donu, 1990. KGST Szakértői értekezlet, (balról jobbra: Karol Kálna, Fehérvári Attila, Tóth László, Czoboly Ernő)

- „Három a magyar igazság” jegyében az ESIS Magyar Nemzeti Bizottságát (MNB) Czoboly Ernő alapította és kitaró munkájával a hazai szakmai közösséget is

sikeresen kapcsolta be a nemzetközi vérkeringésbe. Elnöki feladatát 1994. november 7-ig lelkiismeretesen ellátta úgy, hogy 1988-ban Budapesten megszervezte az European Conference on Fracture rendezvényt, az ESIS ECF7 konferenciát „Kárelemzés - Elmélet és Gyakorlat” címmel. Ezt követően pontosan 20 éven át, 2014. november 7-ig az én vállamat nyomta az ESIS MNB hazai tevékenységének szervezése. A helycserénket megörökítő dokumentumot szemlélteti az alábbi ábra.

1994 november 7-én, (hétfő) 14.00-kor
a BME Mechanikai Technológia tanszék épületében (Bertalan Lajos u. 7.)
a könyvtárban

együttes tudományos ülést tart. Az ülést megelőzően

dél előtt 11 órakor, ugyancsak a tanszék könyvtárban

az ESIS Magyar Nemzeti Bizottsága tisztújító ülésére kerül sor. Az ülésen Dr. Tóth László röviden beszámol az ECF10-ről, amelyet 1994-ben Berlinben rendeztek meg. Kérem, hogy az ülésen (de érdeklődése esetén az ICF ülésen is) vegyen részt és aktív tevékenységével valamint szavazatával támogassa az ESIS MNB-t.

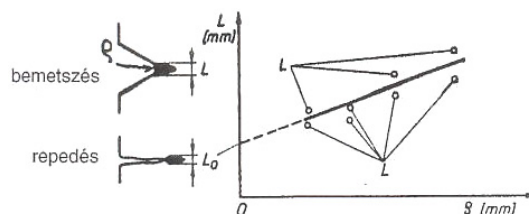
Összességében megköszönöm a közös munkát és a baráti kapcsolatot. Ettől kezdve várom a közös munkát!

Elnökváltás az ESIS MNB élén 1994-ben
Czoboly Ernő megjegyzésével

Mindenképpen kiemelendő oktatási tevékenysége az anyagvizsgálat, törésmechanika, kifáradás és kúszás témakörökben. Ezt egyetemi jegyzeteinek megírásával is segítette. Ezek a publikációs lista segítségével azonosíthatók [1-149]. A mintegy 150 tételt tartalmazó lista igazán meggyőzően támasztja alá a nyelvtudását, nemzetközi ismertségét, elismertségét. Szakmai szervezőképességét az is érzékeltetheti, hogy több mint 30 nemzetközi rendezvényt szervezett és 25 kiadványt szerkesztett.

Kitüntetésének hivatalos indoklásában olvasható a következő mondatrész is: „...Czoboly-Radon módszer kidolgozójaként...” Mit is takar ez? Tekintsük az alábbi ábrát, ahol a különböző p sugarú bemetszést tartalmazó szakító-próbatesteken a törést megelőző képlékeny zóna L magasságú zónái vannak ábrázolva.

A repedést $p = 0$ zérus lekerekítési sugarú bemetszett próbatestnek tekintve extrapolációval meghatározható azon henger magassága (hengeres próbatestet tekintve), ahol a szakadáshoz tartozó fajlagos törésmunka elnyelődik, azaz a George IRWIN által definiált fajlagos repedésterjesztési erő a $G_{IC} = J_{IC} = L_0 W_c$ [Publikációs lista: 149].



A képlékeny zóna magassága (L) a bemetszett szakító próbatest sugarának (p) függvényében

Visszatérve a „három a magyar igazság” frázishoz, a „ráadást” is szokták emlegetni! Ezt testesítse meg az a fénykép, amely Belgrádban készült egy olyan hegesztési



John Radon és Tóth László, Belgrád

konferencián (1989), ahova a Budapest-Belgrád-Budapest utat is együtt tettük meg Czoboly Ernő kérésére.

Kedves Ernő Barátom! Engedd meg, hogy kitüntetésedhez szívből gratuláljak a szakmai közösség nevében is! Sok-sok jót, de alapvetően nagyon jó egészséget és emlékezetes, örömteli pillanatokát kívánva feleséged, fiaid, unokáid és ükunokáid társaságában!

Tóth László

Czoboly Ernő publikációs listája

- [1] Konkoly Tibor, Czoboly Ernő: „Liliput 120” röntgenkészülék gőzerőműveink hegesztett alkatrészeinek vizsgálatában. Magyar Energiagazdaság. Vol.9. 1956. No.2. pp.73-76.
- [2] Konkoly Tibor, Czoboly Ernő: Liliput 120 röntgenkészülék a durvaszerkezeti anyagvizsgálatokban. Gép. Vol.8. 1956. No.4. pp.149-155.
- [3] Szántó István, Czoboly Ernő: Új magyar finomszerkezetvizsgáló célberendezés: a röntgen-deformográf. Gép. Vol.11. 1959. No.2. pp.75-79.
- [4] Czoboly Ernő, Folgens Zoltán: Villamosipari technológia I. Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1959.
- [5] Czoboly Ernő, Folgens Zoltán, Kovács István: Villamosipari technológia II. Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1959.
- [6] Szántó István, Czoboly Ernő: Egy 30 éve működő acél-autókláv öregedésvizsgálata. Kohászati Lapok. Vol.94. 1961. No.10. pp.468-472.
- [7] Czoboly Ernő: Vörösréz pákacsúcsok védelme bevonattal. Finomtechnika. Vol.2. 1963. No.6. pp.161-165.
- [8] Bujdosó Ernő, Czoboly Ernő, Magyar Ferenc: Aluminium zónás tisztításának vizsgálata Zn65 rádióaktív izotóppal. A Fémipari Kutatóintézet Évkönyve, VI. kötet 1963. pp.283-303.
- [9] Ernő Czoboly: Über Probleme der Dehnungsmessung beim Zugversuch. (Werkstoffprüfertagung, Leipzig, 1964. 01. 08-11.) Periodica Polytechnica. Vol.8. 1964. No.4. pp.395-404.
- [10] L. Gillemot, E. Czoboly: Einfluss der Dehngeschwindigkeit auf die wahre Spannungs-kurve. (Berg und Hüttenmannischer Tagung, Freiberg 1964.05.) Freiburger Forschungshefte. Hf. B. 109. 1965. pp.79-93.
- [11] E. Bujdosó, E. Czoboly, F. Magyar: The Determination of the Distribution Coefficient of Zinc with Radioisotope Zn65 by the Zone Melting of Aluminium. Technica Hungarica. Vol.51. 1965. No.9. pp.63-79.
- [12] Lumir Kuchár, Ernő Czoboly: Vypoctové a empirické stanovení rozdělovacího koeficientu zinku v hliníku. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské v Ostravě. Rocník XI. Rok 1965. číslo 5. clánek 227. pp.771-784.
- [13] L. Gillemot, E. Czoboly: Determination of Fatigue Limit Scatter by the Increasing Amplitude Method. (II. Korszerű Méretezési Konferencia, Budapest, 1965. 10.5-10.) Proc. Second Conference on Dimensioning and Strength Calculations. Akadémiai Kiadó, Budapest 1965. pp.287-301.
- [14] Czoboly Ernő: Szakítópróbatestek képlékeny alakváltozásának tanulmányozása. Kandidátusi értekezés. Budapest. 1965. április.
- [15] Gillemot László, Czoboly Ernő: Kifáradási határ szórásának meghatározása lépcsős terheléssel. Gép. Vol.XVIII. 1966. No.8. pp.289-295.
- [16] Czoboly Ernő. Anyagszerkezettan és anyagvizsgálat. Egyetemi jegyzet, Gépszerkesztő szakmérnököknek. Mérnök Továbbképző Intézet. G.85. 1966. 234 p.
- [17] E. Czoboly, I. Havas, E. Jovitiu: A Testing Method of the Tendency of Brittleness Based on the Absorbed Energy to Fracture. IIW. Magyar Nemzeti Bizottság Kiadványa. Doc IX. 1967.
- [18] Czoboly Ernő, Havas István, Eugen Jovitiu: Ridegtörési hajlam megállapítása a törési munka alapján.
- [19] Czoboly Ernő: Körszelvényű szakítópróbatestek képlékeny alakváltozásának néhány törvényszerűsége. (IV. Kohászati Anyagvizsgáló Napok, Balatonszéplak, 1967.05.15-17.) Bányászati és Kohászati Lapok. Vol.101. 1968. No.4. pp.131-134.
- [20] E. Czoboly: Neuere Andwendungsmöglichkeiten elektronischer Messinstrumente im Zugversuch. Materialprüfung. Vol.10 1968. No. 9. pp.299-303.
- [21] E. Czoboly: Testing of Mechanical Properties of Metals Using an Instron Testing Machine. (Instron Symposium, Zakopane 1967.04.) Instron különkiadvány. 1969.
- [22] Czoboly Ernő, Kristyák Ernőné: Kazáncsövek törése kisciklusú fázastó igénybevétel hatására. Energiagazdálkodás. Vol.XI. 1970. No.3. pp.112-115.
- [23] E. Czoboly, J.C.Radon: The Correlation of Specific Fracture Work with Material Toughness. Fracture Group Report No. FG25. Imperial College, London. 1970.
- [24] E. Czoboly, J.C.Radon: Eine neue Methode zur Bestimmung der Bruchmechanischen Werkstoffkenngrösse. (V. Anyagvizsgáló Kongresszus, Budapest, 1970.10.19-24.) Kongresszusi Kiadvány, GTE. 1970. pp.97-103.
- [25] Artinger István, Czoboly Ernő: Ridegtörés vizsgálati eszközei. Gép. Vol.22. 1970. No.12. pp.404-471.
- [26] Gillemot László, Czoboly Ernő: A törés általánosított elmélete. (VI. Hegesztéstechnikai Kongresszus, GTE. Budapest 1970.06.08-13.) Kongresszusi Kiadvány, Budapest, 1971.
- [27] L. Gillemot, E. Czoboly: Generalized Theory of Fracture. (II. Conference on Brittle Fracture, Marianske Lázně, 1970.10.20-22.) Konferencia Kiadvány No.11. pp.1-21.
- [28] Czoboly Ernő: A törésmechanika fejlődése és jelenlegi főbb irányai. Műszaki Tudomány. Vol.43. 1970. pp.391-412.
- [29] E. Czoboly: Bestimmung der Fließkurve im Zugversuch bei beliebigen Temperaturen. Materialprüfung. Vol.14. 1972. No.1. pp.11-14.
- [30] Czoboly Ernő, Havas István: Bemetszett próbatesteken végzett kisciklusú előfázastó hatás a képlékeny zóna kialakulására. Gép. Vol.24. 1972. No.9. pp.323-326.
- [31] J.C.Radon, E. Czoboly: Material Toughness Versus Specific Fracture Work. Proc. Int. Conference on Mechanical Behaviour of Materials. Kyoto: vol.I. 1972. pp.543-557.
- [32] P. Sillár, E. Czoboly, L. Kéry: Deformations of the Articular Cartilage of the Head of Femur and Humerus under Mechanical Stress. Archive Orthop. Unfall-Chir. Vol.74. 1972. pp.231-236.
- [33] Kator Lajos, Artinger István, Czoboly Ernő: Melegen dolgozó szerszámacélok. Műszaki Tudomány, Vol.45. 1972. pp.384-409.
- [34] J. C. Radon, E. Czoboly, G. Kristyák: Specific Fracture Work of Mild Steels. Materialprüfung. Vol.15. 1973. No.1. pp.15-19.
- [35] E. Czoboly, I. Havas: Einfluss der Wechselbeanspruchung mit hoher Spannungs-amplitude auf die Sprödbreuchigenschaften der Baustähle. Materialprüfung Vol.15. 1973. No.3. pp.82-84.
- [36] Burayné Mihályi Erika, Sinay Gábor, Czoboly Ernő: Aluminium ötvözetek ridegtörési hajlamának vizsgálata. Bányászati és Kohászati Lapok. Kohászat. Vol.106. 1973. No.6. pp.270-277.
- [37] E. Czoboly, I. Havas: Effect of Cyclic Plastic Loading on Brittle Characteristic. Proc. Fracture Symposium, Karlovy Vary, 1973. XI. sz. előadás pp.1-14.
- [38] J. C. Radon, E. Czoboly: Specific Fracture Work of a Mild Steel. 7th Annual Symposium on Fracture Mechanics. ASTM Philadelphia, Penns. 1973.

- [39] P. Sillár, L. Kéry, E. Czoboly: A Comparative Study of the Deformations of Intact and Pathologic Articular Cartilage under Mechanical Stress. Arch. Orthop. Unfall-Chir. Vol.78. 1974. pp.21-23.
- [40] Sillár Pál, Kéry Lajos, Czoboly Ernő: Öregkori degeneratív csípő- és vállizület elváltozások összehasonlító vizsgálata. Magyar Traumatológia, Orthopédia és helyreállító sebészet. Vol.17. 1974. pp.67-74.
- [41] Sillár P., Horváth F., Kéry L., Czoboly E., Mészáros T., Massánti L.: A vállizület patológiai, biomechanikai, radológiai, gerontológiai vizsgálata. Poszterelőadás.
- [42] Czoboly Ernő: Beszámoló egy amerikai tanulmányútról. Bányászati és Kohászati Lapok. Kohászat. Vol.27. 1974. No.6. pp.21-23.
- [43] Czoboly Ernő: Reaktortartályok anyagának korszerű vizsgálati eljárásai. Energia és Atomtechnika Vol.XXVII. 1974. No.8. pp.401-404.
- [44] Adlovits Imréné, Boronyák Imre, Czoboly Ernő, Gillemot Ferenc, Szabadits Ödön: A nyomástartó edények hegesztési feszültségeinek meghatározása röntgendiffrakciós feszültségméréssel. Gép. Vol.XXVI. 1974. No.9. pp.338-344.
- [45] E. Czoboly, B. Sándor: Fatigue Behavior of Notched Steel Specimens. Engineering Experiment Station (EES) Report No.39. Madison, Wisconsin, 1974. pp.1-236.
- [46] Czoboly Ernő, Havas István: A töréssel szembeni biztonság vizsgálatának korszerű módszerei. II. Vegyipari Gépészeti Konferencia Kiadványa. GTE. Budapest, 1974. pp.447-456.
- [47] J.C.Radon, E. Czoboly, T.Konkoly: Recent Developments in the Evaluation of Specific Fracture Work. Proc. II. Int. Symposium on Mechanical Behavior of Materials. Kyoto, 1974.
- [48] E. Czoboly, B. Sándor: Cycle-Dependent Softening in Notched Steel Specimens. Journal of Testing and Evaluation. Vol.3. 1975. No.5. pp.343-347.
- [49] E. Buray-Mihályi, E. Czoboly, Z. Buray: Fracture Behaviour and Mechanical Properties of Aluminium Alloy Plates. Materialprüfung. Vol.17. 1975. No.9. pp.316-319.
- [50] E. Buray-Mihályi, E. Czoboly, Z. Buray: Relation between the Fracture Behaviour and Mechanical Properties of Thin Aluminium Alloy Plates. V. Méretezési Konferencia Kiadványa, MTA. Budapest
- [51] E. Czoboly, I. Havas, J.C.Radon: Fracture Evaluation at High Loading Rates by the Extrapolation Method. Proc. „Dynamic Fracture Toughness” Symposium, London, 1976. pp.159-167.
- [52] Czoboly Ernő: Az anyagok változó igénybevételénél mutatkozó tulajdonságai. IX. Kohászati Anyagvizsgáló Napok. OMBKE. Balatonaliga, 1977. Plenáris előadások kötete, pp.5-10.
- [53] E. Czoboly, I. Havas: Einfluss der plastischen Zone auf das Spröbruchverhalten. Neue Hütte. Vol.22. 1977. No.3. pp.147-148.
- [54] J. Ginzler, E. Czoboly: Skúsky nízkocyklojev únavy kotelníhúh sztalej. Zvárníe Vol.XXVI. 1977. No.10. pp.309-312.
- [55] J. Ginzler, E. Czoboly: Opúti malociklovoj usztalosztí kotelníhúh sztalej. Proc. Welded Pressure Vessels and Pipelines Conference, Strbski Pleso 1977. Paper F/7 pp.1-10.
- [56] Czoboly Ernő, Havas István: A törésre való méretezés problémái. Korszerű technológiák, Vol. V. 1977. No.9. pp.43-49.
- [57] Czoboly Ernő, Lichtenbergerné Bajza Edit, Sinay Gábor: A korróziós károsodások teherbíráscsökkentő hatásának vizsgálatairól. Magyar Aluminium, vol.14. 1977. No. 2. pp.37-42.
- [58] Ginzler János, Czoboly Ernő: Erőművi nyomástartó edények kisciklusú fárasztással szembeni követelményei. Gép. Vol.XXX. 1978. No.1. pp.16-18.
- [59] Czoboly Ernő: Törésmechanikai vizsgálatok atomerőművi alkalmazása. Gép. Vol.XXX. 1978. No.2. pp.49-51.
- [60] Burayné Mihályi Erika, Buray Zoltán, Czoboly Ernő, Sinay Gábor: Törési jellemzők vizsgálatának néhány módszertani problémája. III. Aluminium Konferencia '78' Kiadványa.
- [61] Burayné Mihályi Erika, Buray Zoltán, Czoboly Ernő: Fárasztóigénybevétel és porozítás hatása AlMg4 ötvözetű hegesztett kötések ridegtörési hajlámára. VII. Anyagvizsgáló Kongresszus Kiadványa, GTE, Budapest 1978. Vol.I. pp. 43-46.
- [62] J. Ginzler, E. Czoboly: Príszpózoblenije dlja íszpútanj na vűszkótemperaturnuju malociklovuju usztalosztí i nekotorúje rezultatú ísszledovanij nelegirovannoj kotelnój sztalej. Problemű Procsnosztí. 1978. No.7. pp.121-123.
- [63] E. Czoboly, B. Sándor: Íszledovanije rászpredelinija naprazsenij v zónekoncentracij pri ciklicseszkom nagruzsenii. Masinovodemije. 1978. No.4. pp.65-71.
- [64] E. Czoboly, I. Havas: Vlijanije plaszticseszkój zóni na harakterisztíki hrukógó rászisenija. KGST I-13 Hegesztési egyezmény 17.téma tudományos szeminárium. Vaskut, Budapest, 1978. pp.169-174.
- [65] T. Konkoly, E. Czoboly: Measuring the Notch Toughness of Weld Metal and its Consideration in the Weld Defect Evaluation. (Spring Conference ASNT New Orleans, 1978) Materials Evaluation, Vol.36. 1978. No.4. pp.16-17.
- [66] I. Havas, E. Czoboly: Einfluss der Schwingbeanspruchung auf die mechanischen Eigenschaften von Baustählen. Maschinenbautechnik. Vol.28. 1979. No.4. pp.173-174.
- [67] Czoboly Ernő, Konkoly Tibor: Az IIW X. Szakbizottság 1977/78 évi munkája. Gép XXXI. évf. 1979. No.11. pp.439-440.
- [68] I. Havas, E. Czoboly: Vergleichende Untersuchungen zu Bestimmung der Bruchzähigkeit von Baustählen. Proc. V. Symposium Verformung und Bruch, TH., Magdeburg, 1979. pp.102-106.
- [69] E. Czoboly, B. Sándor: Problema opredelénija rászpredelenija naprazsenij obrascov sz nadrezom, podverzaeműh íszpútami na usztalosztí. Periodica Polytechnica. Mechanical Engineering. Vol.22. 1978. No.3. pp.155-167.
- [70] Czoboly Ernő, Havas István: Méretezés és ellenőrzés kérdései a törésmechanika alapján. Géptervezők IV. Országos Szeminárium Kiadványa. GTE - NME, Miskolc 1980. pp.39-44.
- [71] Havas István, Czoboly Ernő: A J-integrál meghatározása különböző módszerekkel. Gép. Vol.XXXII. 1980. No.10. pp.372-374.
- [72] Havas István, Czoboly Ernő: Comparison of Results of Different Methods for Determining Fracture mechanics Parameters in the Elasto-Plastic Range. Periodica Polytechnica. Mechanical Engineering. Vol.24. 1980. No.1-2. pp.19-28.
- [73] E. Czoboly, S. Stanzl, I. Havas, T. Koller: Distribution of Plastic Deformation around a Notch Tip. Proc. Int. Conference on Analytical and Experimental Fracture Mechanics. Rome 1980. pp.177-185.
- [74] A.D.Freed, B.I. Sándor, E. Czoboly: Localised Cyclic Creep in Notched Steel Plates. Int. Jour. of Structural Mechanics and Materials Science. Vol.2. 1981. No.2. pp.79-89.
- [75] Czoboly Ernő: Törésmechanikai anyagjellemzők mérése, adatok. I. Országos Törésmechanikai Szeminárium. GTE Miskolci Szervezet. Aggtelek 1981. pp.83-94.
- [76] T. Konkoly, E. Czoboly: Small Specimen Technique to Assess Fracture Properties of Weldments., ICF5, Cannes 1981. Poster előadás.
- [77] Czoboly Ernő, Havas István, V. Safta, T. Moisa: Az előzetes hidegalakítás hatása egy kazánacél törési tulajdonságaira. Bányászati és Kohászati lapok. Kohászat. Vol.114. 1981. No.9. pp.369-373.
- [78] Czoboly Ernő, Havas István, S. Stanzl, T. Koller: A képlékeny alakváltozás eloszlása a bemetszés környezetében. Gép. Vol.XXXIII. 1981. No.8. pp.298-302.
- [79] V. Safta, T. Moisa, E. Czoboly, I. Havas: Influenta procedurii de deformarea plastica la rece asupra caracteristicilor de rupere ale unui otel pertru recipient sub presiune. Constructia de masini. Vol.34. 1982. No.1. pp.1-7.
- [80] E. Czoboly, I. Havas, F. Gillemot: The Absorbed Specific Energy till Fracture as a Measure of the Toughness of Metals. Proc. Of Symposium on Absorbed Specific Energy/Strain Energy Density. Sijthof and Nordhoff - Akadémiai Kiadó Budapest, 1982. pp.107-129.
- [81] J.C.Radon, E. Czoboly: Absorbed Specific Frature Energy of Polymers. Proc. Of Symposium on Absorbed Specific Energy/Strain Energy Density. Sijthof and Nordhoff - Akadémiai Kiadó Budapest, 1982. pp.181-206.

- [82] I. Havas, E. Czoboly: Vergleichende Untersuchungen zur Anwendung verschiedener Konzepte der elastisch-plastischen Bruchmechanik. Proc. VI. Symposium Verformung und Bruch. TU Magdeburg, Magdeburg, 1982. pp.60-65.
- [83] I. Havas, E. Czoboly: Comparison of J-integral Estimating Methods and Techniques. Proc. Int. Conference on Application of Fracture Mechanics to Materials and Structures. Freiburg. Martinus Nijhoff, The Hague, 1984. pp.359-367.
- [84] Czoboly Ernő, Havas István: A törésmechanika mérőszámainak alkalmazása a mérnöki gyakorlatban. Referátum. MTA Műszaki Tudományok Osztálya. Gépszerkezettani Bizottság, Szilárdsági Méretezés Munkabizottság, Budapest, 1984.
- [85] Czoboly Ernő: Összefoglaló a „Fáradási repedések terjedése I.” című témakör előadásaiból. Gép XXXVI évf. 1984. No.1 pp.25-28.
- [86] Czoboly Ernő, Ginsztler János, Havas István: Ismeretek a kisciklusú és a termikus fáradásról. Gép. Vol. XXXVI. 1984. No.7. pp.241-253.
- [87] E. Czoboly, I. Havas, J. Ginsztler: Relation Between Low Cycle Fatigue Data and the Absorbed Specific Energy. Proc. 5th ECF, Lisboa, EMAS Warley, 1984. Vol.1. pp.481-494.
- [88] T. Konkoly, E. Czoboly: Small Specimen Technique to Assess Fracture Properties of Weldments. Poster előadás. ICF5, Cannes 1981.
- [89] E. Czoboly, I. Havas, J. C. Radon: Size of Plastic Zone in Notched Bars. pp.1017-1021.
- [90] E. Czoboly, I. Havas: Razrabotka projektov metodik dlja opredelenija vlijanija usztalosztii. KGST 3.2.5 probléma SZEVE 22K-03. 1984.
- [91] E. Czoboly, S. Stanzl, T. Lüthi: Determination of Plastic Zone on Armco Iron. Poster. XII. Kohászati Anyagvizsgáló Napok, OMBKE, Balatonaliga, 1985. p.29.
- [92] Konkoly Tibor, Czoboly Ernő: Varratok törési hajlama figyelemmel a réteg elrendezésre. Poster. XII. Kohászati Anyagvizsgáló Napok, OMBKE, Balatonaliga, 1985.
- [93] Czoboly Ernő: A fáradásos repedés terjedési sebességének törvényszerűségei. Poster. XII. Kohászati Anyagvizsgáló Napok, OMBKE, Balatonaliga, 1985.
- [94] Czoboly Ernő, Havas István: A fémek törésének korszerű vizsgálati módszerei. Poster. XII. Kohászati Anyagvizsgáló Napok, OMBKE, Balatonaliga, 1985.
- [95] Czoboly Ernő: A kisméretű fáradási repedések problémái. Gép. Vol. XXVII. 1985. No.5. pp.161-165.
- [96] I. Havas, E. Czoboly: Die Anwendung von Kleinproben mit Seitenkerben zu Bestimmung der Kritischen Werte der J-integrals. Proc. VII. Symposium Verformung und Bruch. TU Magdeburg, Magdeburg, 1985. pp.66-70.
- [97] F. Gillemot, E. Czoboly, I. Havas: Fracture Mechanics Application of Absorbed Specific Fracture Energy: Notched and Unnotched Specimens. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. Vol.4. 1985. pp.39-45.
- [98] E. Czoboly, I. Havas: Ocenka vozdejsztvija predvaritelnoj ciklicseszkoy nagruzki. KGST 3.1.6. probléma. SZEVE 22K-03. 1985.
- [99] E. Czoboly, I. Havas, T. Konkoly, H. Straube, T. Varga: The Significance of Notch Position in Testing Welded Beads. Periodica Polytechnica. Mechanical Engineering. Vol.30. 1986. No.2. pp.165-174.
- [100] E. Czoboly, M. Gálos, I. Havas, F. Thamm: Appropriate Fracture Mechanics Specimens for Testing Rocks. Proc. 6th ECF, Fracture Control of Engineering Structures. Amsterdam, EMAS Warley, 1986. pp.2105-2116.
- [101] J. C. Radon, E. Czoboly: Aspects of Fatigue Crack Growth Under Random Load. 9. Anyagvizsgáló Kongresszus Kiadványa, GTE, Budapest 1986. pp.231-233.
- [102] Á. Csizmazia, E. Czoboly: Determination of Plastic Zones in Compact Specimens of Aluminium. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. Vol.8. 1987. pp.11-19.
- [103] I. Havas, E. Czoboly: Effect of Low-Cycle Fatigue on the Brittle Characteristics of a Structural Steel. Proc. Int. Conference on Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials. TU Braunschweig, Elsevier Applied Science, London, 1987. pp.702-706.
- [104] Czoboly Ernő: A kisméretű fáradási repedések vizsgálatának problémái. III. Országos Törésmechanikai Szeminárium Kiadványa. GTE Miskolc-Egyetemváros, Lillafüred, 1987. pp.20-32.
- [105] L. Borbás, E. Czoboly, M. Gálos: Fracture Toughness of Marble Determined on „Easy-to-Prepare” Specimens. Poster. Proc. 7th ECF, Budapest, 1988. EMAS, Warley pp. 561-563.
- [106] G. Csikós, E. Czoboly, I. Havas: Fracture Mechanics Parameters of Welded Joints Determined by the Extrapolation Method. Proc. VIII. Symposium „Verformung und Bruch”. TU Magdeburg, Magdeburg, 1988. pp.120-123.
- [107] J. C. Radon, E. Czoboly: Problems of Fatigue Crack Growth Measurement Under Random Load. Periodica Polytechnica. Mechanical Engineering. Vol.32. 1988. No.2. pp.107-117.
- [108] E. Czoboly, G. Frigyk, I. Havas, J. Lovas, Gy. Somogyi, L. Tóth: Fracture Mechanics Concept to Increase the Reliability of High-Pressure Gas Cylinders. Proc. ICF7 „Advances in Fracture Research”. ICF7, Houston, Pergamon Press, New York, 1989. pp.3555-3562.
- [109] Czoboly Ernő, Havas István: Fémek törése és fáradása. 18.sz. füzet a Hegesztéstechnológia c. tárgyhöz. BME Mech. Tech. tanszék, Budapest, 1989.
- [110] E. Czoboly, I. Havas: Deformation in the Vicinity of Notches. Proc. Int. Conference „Future Trends in Applied Mechanics”, Athen, 1989. pp.469-480.
- [111] E. Czoboly, I. Havas: Über die Probleme der Lebensdauervorhersage von zyklisch beanspruchter Bauteile. 6.Schule „Experimentelle Methoden der Festkörper-mechanik”. AdW der DDR, Institut für Mechanik. 1989. April 17-20.
- [112] E. Czoboly: Fatigue Crack Propagation. Proc. 5th Int. Fracture Mechanics Summer School „The Application of Fracture Mechanics in Life Estimation of Power Plant Components”. Dubrovnik, EMAS, Warley, 1990. pp.103-116.
- [113] I. Havas, E. Czoboly: Statistical Evaluation of the Toughness Characteristics of a Boiler Steel. Proc. 8th EGF „Fracture Behaviour and Design of Materials and Structures”. Torino, 1990. EMAS, Warley pp.417-420.
- [114] Czoboly Ernő: Bemetszések előtti képlékeny zónák és a szakítópróbatessz kontrakciós zónájának összehasonlítása. IV. Országos Törésmechanikai Szeminárium, ME Mech. Tech Tsz., Lillafüred, 1991. pp.121-128.
- [115] E. Czoboly, I. Havas, J. Lovas: About Modelling the Notch Tip Region by Specimens Exposed to Low Cycle Fatigue. Proc. IX. Symposium „Verformung und Bruch” TU Magdeburg, Magdeburg, 1991. pp.139-143.
- [116] A. Csizmazia, E. Czoboly: Size of Plastic Zone as a Function of Loading Cycles. Poster. ICSOBA, Balatonalmádi, 1992.
- [117] E. Czoboly: A Hungarian Method for Estimating KIC of Tough Materials. Hanyang University, Seoul, 1992.
- [118] E. Czoboly: New Trends in Design Up-to-date Material Parameters. Chungnam National University, Seoul, 1992.
- [119] A. Csizmazia, E. Czoboly: Plastic Zones Around Notch Tips After Cyclic Loading. Proc. ICF8., Kiev, 1993.
- [120] E. Czoboly, I. Havas, J. C. Radon: Generalised Fracture Theory. In „Fracture”, a topical encyclopedia of current knowledge dedicated to Alan Arnold Griffith. Ed.: G. Cherepanov. Krieger Publ. Co., Melbourne, 1995. pp.234-243.
- [121] Czoboly Ernő, Havas István: Töréssel kapcsolatos kutató és oktatómunka a BME Mechanikai Technológia tanszéken. „Egy súlyos ipari katasztrófa és hatása a műszaki fejlődésre” GTE szeminárium kiadványa. GTE, Budapest, 1994. pp.1-12.
- [122] E. Czoboly, P. Pellionisz: Investigation by Acoustic Emission Technique to Assess Material Embrittlement. Proc. Euromat 94. Balatonaliga. Vol.II. 1994. pp.827-832.
- [123] E. Czoboly, F. Gillemot: Evaluation of the IAEA Database on Irradiation Effects. Proc. Euromat 94. Balatonaliga. Vol.I. 1994. pp.301-303.
- [124] E. Czoboly, I. Havas: Application of ASPEF to Determine the Parameters of Fracture Mechanics. 25 Year Jubilee Conference of ISIM, Timisoara, 1995.
- [125] Csizmazia Ferencné, Czoboly Ernő: Fárasztott próbatessztek képlékeny

- zónái. V. Országos Törésmechanikai Szeminárium Kiadványa. ME, Miskolc-Tapolca, 1995, pp.167- 175.
- [126] E. Czoboly, Á. Csizmazia, I. Havas: Experimental Determination of Plastic Zones Physicochemical Mechanics of Materials. Vol.32. 1996. No.1. pp.99-110.
- [127] E. Czoboly: Overview on Monotonic, Creep and Cyclic Stress Strain Behaviour at High Values of Strain. Nato Advanced Seminar „Mechanical Behaviour of Material at High Temperature. Sesimbra (Portugal) Nato Series 3. High Technology. 1995, Vol.15. pp.3-22.
- [128] E. Czoboly: The Hungarian Korean Technical Cooperation Center Foundation. Alapítvány és Világ. MOTKA. Budapest 1995.
- [129] E. Czoboly: The Effect of Loading and Temperature on Creep and Fatigue of Welded Joints. Zavarivonje 96, Beograd, 1996. pp.1-4.
- [130] E. Czoboly: Fracture Reliability of Engineering Structures. Proc. of the Joint Korean- Hungarian Symposium on Structure Reliability, Budapest, 1997. pp.173-181.
- [131] E. Czoboly: About the Hungarian Academy of Science and its Role in Organization of Research. Workshop on Collaboration Possibilities with Czechia, Hungary and Poland in Science, Technology and Development. Bergen, 1997.
- [132] E. Czoboly: Basic Mechanisms of Creep and the Testing Methods. International Centre for Mechanical Sciences. Udine, 1997.
- [133] Czoboly Ernő, Gillemot Ferenc, Uri Gábor: A K_{IC} meghatározásának tapasztalatai. VI. Országos Törésmechanikai Szeminárium Kiadványa. ME. Miskolc-Tapolca, 1997. pp. 174-188.
- [134] Gillemot F., Czoboly E., Fekete T., Gajdos F., Gillemot L., Pálfalvi J., Uri G.: Részlet a Reaktorszerkezeti Anyagok Öregedésének Speciális Kérdései c. kutatási jelentésből. 1.sz. részjelentés. K_{IC} meghatározása. OMFB szerződés száma: 94-97-47-0818. AEKI NRL Budapest 1995.
- [135] Gillemot F., Czoboly E., Fekete T., Gajdos F., Gillemot L., Pálfalvi J., Uri G.: Részlet a Reaktorszerkezeti Anyagok Öregedésének Speciális Kérdései c. kutatási jelentésből. 3.sz. részjelentés. Mérések termikusan öregített anyagokon. OMFB szerződés száma: 94-97-47-0818. AEKI NRL Budapest 1995.
- [136] E. Czoboly, F. Gillemot, F. Oszvald: Small Specimen Testing Applied at Surveillance Extension. ASTM STP 1329 „Small Specimen Test Technique” ASTM, Philadelphia, 1998. pp.163-172.
- [137] Czoboly Ernő: Tudományos együttműködés a Magyar és a Koreai Köztársaságok között. Poszter. Gépészet '98 Konferencia, Budapest 1998.
- [138] E. Czoboly, F. Gillemot, G. Uri: Increasing Reliability of Nuclear Power Plants by Means of Fracture Mechanics Considerations. Progress Report for IAEA CRP „Assuring Structure Integrity of Reactor Pressure Vessels” 1998. and Proc. 2nd Joint Korean – Hungarian Symposium on Structural Reliability. Budapest 1999.
- [139] Gillemot Ferenc, Czoboly Ernő, Fekete Tamás: Leak before break elv alkalmazása. Tanulmány. Budapest, KFKI AEKI, 1999.
- [140] G. Uri, F. Gillemot, M. Horváth, E. Czoboly: WWER-440 RPV Weld-Metal Irradiation Embrittlement Testing. Research Report for IAEA, Wien 1999. projekt number: 9596.
- [141] Horváth Márta, Czoboly Ernő, Gillemot Ferenc: Reaktortartály anyagok mestergörbéi. Kutatási jelentés. Budapest, KFKI AEKI 1999.
- [142] Czoboly Ernő, Gillemot Ferenc, Horváthné Lenhardt Márta, Uri Gábor: Atomerőműveknél alkalmazható, kis próbatestes K_{IC} mérés. VII. Országos Törésmechanikai Szeminárium. BAY-LOGI, Miskolc, 2000. Előadások CD-n.
- [143] Gillemot Ferenc, Czoboly Ernő, Horváth Lászlóné, Uri Gábor: Nyomás alatti termikus sokk analízisének fejlesztése. I. Kötet. OMFB szerződés keretében készült. Szerződés száma: ALK-00012/98. KFKI AEKI, Budapest. 41+15 oldal.
- [144] Czoboly Ernő, Gillemot Ferenc: A K_{IC} meghatározása kis próbatestekkel: egy új amerikai szabvány ismertetése. Anyagvizsgálók Lapja. Vol.XI. 2001. No.1. pp.10-11.
- [145] D.V. Singh, E. Czoboly: Dealing with Waste: Reuse, Recycle and Environment. Részlet az „International Council of Academies of Engineering and Technological Sciences” (CAETS) kiadványában. 2002.
- [146] Czoboly Ernő: A törésmechanika alapjai. Dunaújvárosi Főiskola, Dunaújváros, 2003. pp.1-75.
- [147] E. Czoboly: Eine Möglichkeit wissenschaftliche Potenzial zu verstärken: Kooperation. „Ein erfolgreiches Europa im weltweiten Wettbewerb.” Hanns Seidel Stiftung, München. 2006.
- [148] E. Czoboly, F. Gillemot, L. Gillemot, M. Horváth: Assuring Structural Integrity of Reactor Pressure Vessels. Progress Report, KFKI AEKI, 1998.
- [149] Czoboly Ernő, Havas István, Orbulov Imre Norbert: Törési vizsgálatok a BME Mechanikai Technológia Tanszéken. Anyagvizsgálók Lapja. Válogatás 2012. pp.43-45.



ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA ÚJRA NYOMTATOTT VÁLTOZATBAN

16 év után újra kézbe vehetik

az olvasók

az Anyagvizsgálók Lapját!

A lap újjászerveződött csapatának köszönhetően az első nyomtatott verzió **2022-től** elérhető.

A **nyomtatott kiadvány negyedévente** – teljesen megegyező tartalommal, mint az online letölthető számok – **előfizetéses formában** jelenik meg.

Amennyiben igényt tartana rá, kérem jelezze a MAROVISZ felé az alábbi email címen:

marovisz@marovisz.hu



Balatoni Ankét résztvevőinek látogatása Répcelakon

Visit of Balaton Ankét participants to Répcelak

A Gépipari Tudományos Egyesület Hegesztési Szakosztályának Nyomástartó edények és csővezetékek hegesztése szakosztályának Balatoni Ankét (korábban Csepaki ankét) szervező bizottsága 2014-től elsősorban az ankét résztvevői számára üzemlátogatásokat szervez. Eddig a siófoki KVV-nél, a gönyői EON erőműben, a Mátrai Erőműben, illetve a Tiszai Vegyi Kombinátban tettünk látogatásokat 10-20 fő érdeklődővel.

Az idén áprilisban a Linde Gáz Magyarország Zrt. répcelaki gázüzemébe mehettünk, ahol 30 fő részvételével, a vendéglátó szakembereinek jóvoltából igencsak tartalmas, érdekes program állt össze.



A résztvevők egy része a regisztrációnál



A répcelaki gázüzem bejárati épülete

A program megkezdése előtt szinte már megszokott módon még egy Covid teszten is átestünk. A látogatási program első részében 4 előadás keretében bemutatásra került a LINDE tevékenysége, a széndioxid bánya és tisztító üzemek működése, a szárazjég gyártás, a palack töltés, valamint a gáz ellátási formák. A bemutató után a védőfelszerelések felvételét követően elhaladva az elhíresült 1969-es baleset emléktáblája mellett beléphettünk az üzembe,



A szakma érdekessége



Az ebéd

ahol közvetlen formában a minket kísérő szakemberekkel konzultálva válaszokat kaptunk a kérdéseinkre is. A látogatás befejeztével még egy ebédre is vendégül látott minket az üzem.

Köszönet a LINDE-nek a tartalmas programért!

Fodor Olivér



*Az 1969-es tartály robbanás
áldozatainak emléktáblája*

Tárgy: Jelentkezési felhívás a 2022-ben tartandó **42. Balatoni Ankétra**

Tisztelt Kolléga!

A GTE Százhalombattai Területi Szervezete és a Magyar Hegesztési Egyesület, mint társszervező 2022-ben is megrendezi, hagyományos formában, az őszi Balatoni (korábbi nevén Csopaki) Ankétját.

**Kihívások és válaszok a nyomástartó rendszerek gyártása, javítása, karbantartása,
vizsgálata területén
címmel**

Az elmúlt világjárvány kapcsán szinte minden területen átértékeljük az eddigi tevékenységünket. Új energiaforrások kerültek előtérbe, a fizikai munkaerő korlátlan elérhetősége bizonytalanná vált, ezért felértékelődött a robotizáció. Új szerkezeti anyagok terjedtek el melyek megmunkálásához új technológiákra volt szükség. A vegyiparban, olajiparban megjelenő új eljárások is új megoldásokat igényeltek. Természetesen idén is foglalkozunk a jogi szabályozás és a szabványosítás kérdéseivel, melyek nélkül nem lehet meghozni műszaki döntéseket.

Az ankét továbbképzésként való elfogadtatása a Magyar Mérnöki Kamaránál folyamatban van. Az ankétot, az alábbi témakörökben, egymást követő szekcióüléseken kívánjuk lebonyolítani.

A témakörök:

1. Iparpolitikánk aktuális kérdései, a jogi szabályozás hogyan segíti a műszaki fejlődést, képzést
2. A hidrogén hatása a szerkezeti anyagainkra
3. A növelt szilárdságú szerkezeti anyagok felhasználásának lehetőségei
4. A robotok alkalmazásának lehetősége iparágunkban
5. Mesterkurzus a karbantartásban alkalmazható korszerű kézi szerszámokról
6. Fórum: Szakemberek kérdeznek a mérnök képzésről, mérnök tovább képzésről a műszaki felsőoktatás vezetőitől

Az ankéton immár ötödik alkalommal kerül sor a „Nyomástartó Rendszerek Biztonságáért Díj” átadásra, melyet a Gépipari Tudományos Egyesület és a Magyar Olaj- és Gázipari Múzeum alapított 2016-ban az ankét rendszeres résztvevőinek javaslatára.

Az első négy szekciókban 20-25 perces előadásokat tervezünk, melyre a felkért előadók mellett várjuk a kollégák jelentkezését is a mellékelt jelentkezési lapon. A fórum során lehetőség adódik a hallgatóságot érintő bármely szakkérdés megvitatására.

Az ankét helyszíne: **Hotel Magistern**

8600 Siófok, Beszédes József sétány 72. (Aranypart)

Az ankét időpontja: **2022. november 17-19.**

(A hivatalos program az első nap 14 órától a harmadik nap 12 óráig tart.)

Felhívás

A nyomástartó rendszerek biztonságával kapcsolatban 1979-ben, Répcelakon 1969. január 2-án bekövetkezett ipari katasztrófa 10. évfordulóján indult, évenként megrendezett „Csopaki-rendezvény”, később **Balatoni Ankét** értékeinek megőrzéséhez kötődően a Gépipari Tudományos Egyesület (GTE) és Magyar Olaj- és Gázipari Múzeum (MOGIM) **„NYOMÁSTARTÓ RENDSZEREK BIZTONSÁGÁÉRT DÍJ”** elismerést alapított a következő célkitűzéssel:

- A díjat azok a nyomástartó-rendszer tervezők, fejlesztők, gyártók, üzemeltetők, vizsgálók, oktatók, hatósági szakemberek kaphatják, akik munkájuk során huzamosabb időn keresztül az alapítói célban megfogalmazott tevékenységet végezték.
- A bronz plakett és oklevél mellett a díjazott pénzjutalomban is részesül, amelynek összegében a Károly Róbert verette „arany forint” mindenkor értéke az irányadó.
- Az évenkénti egy díjazott személy kiválasztásában a hazai szakembergárda javaslata alapján a díj Kuratóriuma dönt.
- A díj átadására a Balatoni Ankéton ünnepélyes keretek között kerül sor, első alkalommal 2017-ben.
- A díj Alapító Okirata a GTE honlapján megtekinthető.

Tisztelettel kérjük szakembereinket, hogy javaslataikat néhány soros indoklással **2022. szeptember 1-ig** küldjék meg a következő címekre:

Funk Orsolya: penzugy@gteportal.eu és
Tóth László: laszlo.toth@bayzoltan.hu

Amennyiben a díj összegének fedezésében és az ebben rejlő reklámértékben kíván tájékozódni, úgy az előbbieken megadott címeznél érdeklődjön, ahonnan kimerítő tájékoztatást kaphat.

Az alapítók meggyőződéssel vallják, hogy a műszaki szakmai közösség erősödését, társadalmi szerepének tudatosítását szolgálják azzal, hogy az arra érdemes, és szakmánk közösségének tiszteletére érdemes kollégánk munkáját ezúton éves rendszerességgel elismeri.

Eddigi díjazottak:

2017 Kurucz István
2018 Fehérvári Attila
2019 Bacskai Antal
2020 (a COVID-19 miatt a rendezvény elmaradt)
2021 Gyarmati István

Könyvismertetés

A. A. Dubov: Metall Magnetic Memory Method. Purpose and practical capability

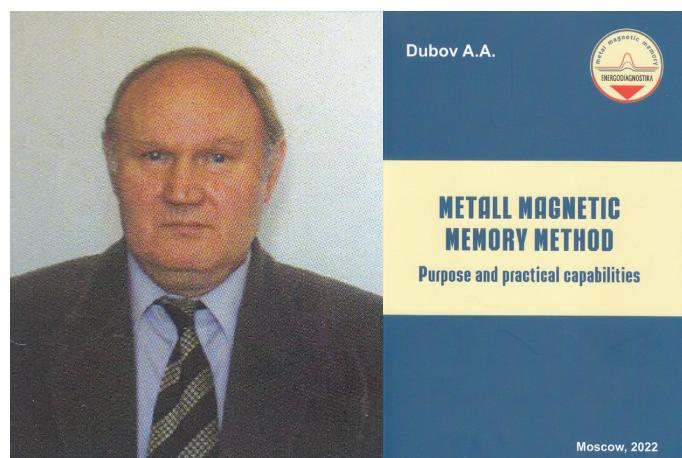
Book review: A. A. Dubov: Metall Magnetic Memory Method. Purpose and practical capability

Meglehetősen érdekes, inkább azt is mondhatnám, információ dús könyv jelent meg 2022-ben Moszkvában A. A. Dubov tollából „Metall Magnetic Memory Method. Purpose and practical capability” címmel. A 149 oldal terjedelmű, angol nyelvű könyvet a „Roliks” LLC kiadó bocsátotta útjára (www.roliksprint.ru) mindössze 200 példányban. A könyvből – e mellett – 200 orosz nyelvű példány is megjelent. Amikor a Tisztelt Olvasó eljutott eddig a mondatig, gondolom azonnal megfogalmazódott benne, hogy miért is jelenik meg e könyv ismertetése? A válaszem egyszerű, kézenfekvő és könnyen értelmezhető – és még hiszek is az igazamban. Kezdjük mindjárt a tényekkel:

- Az Anyagvizsgálók Lapja 2020/IV. száma az MMM (Metal Magnetic Memory) vizsgálatok hazai tapasztalatainak bemutatására fókuszált, mondhatnám úgy is, hogy a lap célszáma volt. A közlemények szerzői összefoglalták mindazon ismereteiket, tapasztalataikat, amelyeket mind a fizikai alapok tisztázása, mind pedig a gyakorlati vizsgálatok elvégzése, kiértékelése során szereztek. A közlemények szerzői között olvasható Ladányi Péter, Trampus Péter, Magyar Lajos, Dandé Kristóf, Skopál István és Joó Gyula.
- Az MMM vizsgálatok végzésének hazai központjaként a Trans Lex Work Kft. tekinthető, azaz hazánkban itt „sűrűsödtek” az ismeretek e témakörben.
- Az eljárás alkalmazásához ISO szabványok jelentek meg a vizsgálatokhoz kötődően.
- Nemzetközi konferenciát szerveztek hazánkban az alkalmazások során feltárt ismeretek széleskörű megismertetésére.
- A MAROVISZ keretében egy olyan munkacsoport alakult, amelynek tagjai kifejezetten az MMM vizsgálatok végzésére, szakmai értékelésére fókuszálnak.
- Nem szabad azonban szó nélkül elmenni amellett sem, hogy a fentiek ellenére még napjainkban „MMM vizsgálati módszerről” beszélünk a magyar nyelvű közleményekben, azaz nem sikerült megfogalmazni, közkinccsé tenni olyan kifejezést, amely a széles szakmai kör használható.

A röviden bemutatandó könyv olyan szempontból is nagyon figyelemre méltó, hogy fejezeteiből világos kép alakulhat ki az olvasóban, hogy világszerte miképpen áll az MMM módszer alkalmazása, mely országok és milyen volumenben alkalmazzák. A hét fejezetet magába foglaló könyv tartalmaz a vizsgálat elméleti és gyakorlati háttéréhez kötődő fejezeteket ugyanúgy, mint az alkalmazás földrajzi megoszlását bemutató részt, de ugyancsak kitér a módszerrel kapcsolatban leggyakrabban felvetett kérdéseket és válaszokat összefoglaló témakörök ismertetésére is.

A könyv kb. egyharmad terjedelemben foglalkozik az első témakörrel, kitérve a szabványosítási folyamatokra



érzékelte a nehézségeket és bemutatva az eredményeket. Bemutatja azt is, hogy az MMM módszer miképpen illeszthető a mérnöki szerkezetek állapotfelmérésének eddig elfogadott általános rendszerébe, milyen speciális műszerezettségre van szükség és milyen típusú vizsgálati eredményekhez lehet jutni.

A részleteket nem ismerő, a tájékozódás igényeit kielégítő adatok, ismeretek birtokába való beférkőzés kielégítését az ötödik fejezet adhatja, amelyben egy „világkép” megrajzolását tűzte ki célul a könyv szerzője. Mivel a volt Szovjetunió területén fogalmazódott meg az első alkalmazások igénye és lehetősége, az itt végrehajtott vizsgálatok tapasztalatai kerülnek összefoglalásra mintegy 30 oldal terjedelemben. A gyakoriságot, a számosságot érzékeltesse a következő két szám: ezres nagyságrendű az MMM módszerrel elvégzett vizsgálatok száma és több mint 2000 fő szakember képzése történt meg a 1996-2020 évek között. A vizsgált szerkezeti elemek között hőerőművi berendezésektől kompozit anyagú csőcsatlakozásig rendkívül eltérő anyagú és kialakítású elemek szerepeltek. A nemzetközi piaci térhódítást – talán – az is jellemezheti, hogy 1995-2009 között 67 vizsgálatot sorol fel a szerző azzal a megjegyzéssel, hogy a lista nem teljes. A 2010-2020-as periódust pedig úgy jellemzi, hogy a vizsgálatok gyakorisága, mennyisége „szignifikánsan növekedett” (has significantly increased).

Tételesen beszámol a Lengyelországban, Indiában, Argentínában, a Cseh Köztársaságban, Szlovákiában, Malaysiában, Délkelet Ázsiában és hazánkban folyt szakmai tevékenységekről és piaci sikerekről.

Külön fejezetet szán az ICNDT keretében megszervezett szakmai tevékenység rövid ismertetésére, ahol egy munkacsoport is felállításra került. Vezetője hazánkban Ladányi Péter és német részről G. Dobmann. A munkacsoport létrehozásában a kezdeményező szerep az EFNDT elnökének, Trampus Péternek jutott, aki az ECNDT-2018 konferencián Göteborgban (Svédország) tett erre javaslatot. A. A. Dubov a magyar szakemberek szerepét az MMM

módszer világméretű elterjesztésében azzal (is) elismeri, hogy szakmai életrajzuk mellett részleteiben is összefoglalja mindazon eseményeket, történeteket, amelyekben a hazai szakembereink úttörő munkát végeztek.

A könyv utolsó, hetedik fejezete pedig azokkal a kérdésekkel foglalkozik, amelyeket a legkülönbözőbb konferenciák laikus, vagy a témakör „vált fülű” résztvevői eddig gyakorta feltettek az MMM módszer alkalmazásával kapcsolatban, s melyre a könyv szerzőjétől autentikus válaszokat olvashatunk.

Engedje meg a Tisztelt Olvasó, hogy a könyvismertetésem összefoglalásaként egy közhelyszerű megfogalmazáshoz nyúljak, ami így hangzik: „egy elkészült munka

eredményeinek bemutatását csak abbahagyni lehet”. Teszem ezt én is, azzal a megjegyzéssel, hogy gratulálok a Szerzőnek azon erőfeszítéseire, amelyet a nemzeti szakmai életben kifejtett, ill. hazánk szakembereinek – többek között Trampus Péternek, Ladányi Péternek és a TRANS LEX WORK Kft. tulajdonosi körének – azért, ahogyan és amilyen eszközökkel segítettek egy új, MMM vizsgálati módszer megismertetését, alkalmazásának világméretű elterjesztését. Előző mondatom valódiságát az sem csorbíthatja, ha meggyőződéssel hiszem, hogy a fejlődés elindult, de még bizonyosan számos új eredmény is születni fog e témakörben.

Tóth László



www.lindegas.hu

A Dunaújvárosi Kompetencia Központ és az újonnan alakult „Paks II” munkabizottság; tervek, célok...

The Competence Centre of Dunaújváros and the newly formed "Paks II" working committee; plans, objectives...

A Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Tudományok Osztályának Anyagtudományi és Technológiai Tudományos Bizottsága kibővített ülést tartott 2022. május 11-én, melyen többek között megalakult a Paks II munkabizottság, melynek vezetője Trampus Péter lett.

Gondolatait és jövőbeni terveit a Paks II munkabizottsággal kapcsolatban, valamint a Dunaújvárosi Egyetemen létesített Kompetencia Központról is megosztotta. Az eseményen elhangzott beszédét az alábbiakban olvashatja a Tisztelt Olvasó.

Szerkesztőbizottság



A Paksi Atomerőmű kapacitás fenntartását megvalósító új reaktorblokkok (Paks II) létesítése jelenleg az ország előtt álló legjelentősebb feladatok egyike. A projekt sikeres végrehajtása – mind a műszaki tartalom, mind a határidő és a pénzügyi keretek tekintetében – hosszú időre meghatározza hazánk energia stratégiáját és hozzájárul az ország globális éghajlatváltozással kapcsolatos vállalásai teljesítéséhez. Ez a megaprojekt minden résztvevőjétől átlagon felüli energiát igényel, és egyúttal megtisztelő feladat.

A kormányzat 2019 végén úgy döntött, hogy az új paksi blokkok létesítésének támogatására – a gépésztudományokhoz kapcsolódó anyagtechnológiai, anyagvizsgáló és hegesztési szakértői, valamint e technológiai területekkel összefüggő szakember képzési feladatok ellátására – Kompetencia- és Kutatóközpontot létesít a Dunaújvárosi Egyetem szervezeti keretein belül. A kormányzat a döntéshez forrást is rendelt, amit az egyetem a laboratóriumok fejlesztésére és létesítés-specifikus képzési anyagok kidolgozására fordított. A Kompetencia Központ kialakítása a befejezéséhez közelít.

A Kompetencia Központtól elsősorban, de nem kizárólagosan, a következő feladatok elvégzését várják a létrehozói:

- roncsolásos és roncsolásmentes anyagvizsgálatok végzése, a vizsgálati eredmények komplex értékelése, roncsolásmentes vizsgáló rendszerek minősítése,
- hegesztési feladatokra való felkészülés támogatása, hegesztéstechnológiák és hegesztők minősítése,
- gyártási és vizsgálati technológiák szakvéleményezése,
- a létesítés, üzembe helyezés során váratlanul felmerülő szakmai kérdések megoldásában való részvétel,
- a tulajdonos (üzemeltető szervezet) szakmai támogatása a hatósági engedélyeztetési folyamatban,
- a létesítés során alkalmazott anyagvizsgáló eljárások oktatása, vizsgáztatás és ahol szükséges, minősítés és tanúsítás.

A Kompetencia Központ – létrehozásának alapvető koncepciójával összhangban – nem a létesítés napi munkáját fogja kiszolgálni, hanem a gépésztudomány jelzett területein felmerülő szakmai kérdések műszakilag korrekt megoldásához fog hozzájárulni, és ennek alapját a központ kompetenciája kell, hogy biztosítsa az adott szakmai-tudományos területen.

Akik részt vettek az üzemelő paksi reaktorblokkok támogatásában, azok emlékezhetnek, hogy az 1980-as és 90-es években jogszabály írta elő, hogy vezető tudományos intézetnek kell az előzőekben felsorolt tevékenységeket végeznie. Ez a vezető tudományos intézet – az akkori kormány kijelölése alapján – a Vasipari Kutató Intézet (később Vasipari Kutató és Fejlesztő Vállalat), azaz a VASKUT volt. Ma ilyen jogszabály nem létezik, de a feladatok – a maguk sokrétűségével – adottak.

A vázolt szakértői feladatok elvárt szintű elvégzésének a feltétele – amit az új entitás elnevezése is kifejez – a központ kompetenciája az adott műszaki-tudományos területen. Értelmezésünk szerint itt a kompetencia a tudományosan megalapozott szakmai tudást, a szükséges vizsgálati gyakorlatot, az elemző tevékenységek (számítások, szimulációk) elvégzésére, illetve a különböző információk szintetizálására való képességet, továbbá a magyar és orosz nukleáris szabályozás szükséges mélysegű ismeretét jelenti.

A Dunaújvárosi Egyetem vezetése azon dolgozik, hogy az új paksi blokkok létesítésének a támogatásához szükséges műszaki-tudományos háttérrel létrehozza. A feladat, ami egyelőre csak a létesítés fázisára vonatkozik, de minden bizonnyal folytatódni fog az atomerőmű üzemeltetésének az időszakában is, csak együttműködő partnerek bevonásával lesz elvégezhető.

Az egyetem rektora az MTA VI. Műszaki Tudományok Osztályának elnökén keresztül az Akadémia Anyagtudományi és Technológiai Tudományos Bizottsága elnökéhez fordult, és támogatást kért a Kompetencia Központ működéséhez. A Tudományos Bizottság tavaly

ősszel kihelyezett ülést tartott az egyetemen. Itt körvonalazódtak a támogatás lehetséges keretei, aminek első lépése egy szakemberekből álló, operatív csoport – munkabizottság – megalakításáról hozott döntés volt. A kihelyezett ülést további, szűkebb körű, operatív megbeszélések követték a Bizottság vezetésének és az egyetem bizottsági tagjainak a részvételével. Ennek eredményeként a Bizottság elnöke engem, mint a Bizottság tagját, kért fel a megalakítandó „Paks II” munkabizottság vezetésére. A felkérést elfogadtam.

Az előző ciklus lejártá után, a 2021-ben megalakult új Bizottság, az Akadémia egyik legnagyobb létszámú tudományos bizottsága, szükségesnek látta az albizottság struktúrájának átalakítását. A kialakult gyakorlatnak megfelelően a Bizottság elsősorban a habitusvizsgálati és az ahhoz kapcsolódó ügyekkel, valamint a szakma, illetve a tudományterület egészét érintő kérdésekkel foglalkozik inkább. Nem valószínű, hogy a Bizottság valamennyi tagja közvetlenül érdekelt lenne nukleáris ügyekben. Ugyanakkor a nukleáris terület mindegyik albizottság témakörét magába foglalja, természetesen egy szűkebb területre koncentrálni. Ezért döntött a Bizottság elnöke egy, az adott feladatra szabott munkabizottság létrehozásáról. A tudományos bizottságoknak egyébként kiemelt szerepet szán Freund Tamás elnök úr is az Akadémia küldetésének megvalósításában, ahogyan ez a megválasztását követően a Köztisztület tagjaihoz írt levelében olvasható.

A „Paks II” munkabizottság elsődleges feladata az lesz, hogy kidolgozza, majd koordinálja az új atomerőművi

blokkok létesítéséhez (és szinte biztosan állítható, hogy később az üzemeltetéséhez) szükséges hazai anyagtudományi és anyagtechnológiai kompetencia megszerzését célzó programot, azaz összekötő kapcsolatot képezzen a Dunaújvárosi Egyetem, a hazai kutató helyek és a Bizottság között. A koordináció az egyes programelemek harmonizálását, valamint a program teljességének a biztosítását célozza.

Tisztában vagyunk azzal, hogy a finanszírozás elengedhetetlen feltétele az eredményes kutató munkának, mely megoldandó feladat. Ennek érdekében az egyetem vezetése már eddig is tett lépéseket, és a kérdéssel a jövőben is foglalkozni fog.

Átgondolva az új atomerőművi blokkok létesítésének előzőekben vázolt feladatait, az idei év kezdetén megszólítottam azokat az intézményeket, amelyek részben eddigi tevékenységükkel, a Paksi Atomerőművel kapcsolatosan vagy azon kívül, részben egyéb lehetőségeikkel potenciális résztvevői lehetnek a munkabizottságnak. Kedvező válaszokat kaptam.

A közeljövőben megszervezem az első munkaértekezletünket, amelyen a munkabizottság megalakításának operatív kérdéseiről, a személyi összetételről, a koordinált kutatási program legfontosabb elemeiről, a munkamódszerről, valamint a munkabizottság égisze alá sorolható egyéb lehetőségekről (például tematikus konferencia szervezése, paksi beruházással foglalkozó rovat indítása hazai szaklapban és hasonlóak) fogunk beszélni.

Trampus Péter



<https://www.paks2.hu/>



Európai Szerkezetintegritási Társaság (ESIS) - I. rész: Általános bemutatás

European Structural Integrity Society (ESIS) - Part I: General introduction

Az Európai Szerkezetintegritási Társaság (ESIS – European Structural Integrity Society) egy nemzetközi nonprofit mérnöki tudományos társaság. Célja a szerkezeti integritás minden aspektusára vonatkozó tudásbázis fejlesztése és bővítése, és ezen ismeretek világszerte történő terjesztése azzal a céllal, hogy javítsa a mérnöki berendezések, alkatrészek és szerkezetek biztonságát és teljesítményét.

Életútjának kezdete 1978. novemberére nyúlik vissza, a Darmstadtban (Németország) tartott Nyári Egyetem időszakára. Akkoriban a European Group on Fracture nevet viselte. 1979 és 1988 között jöttek létre az első műszaki bizottságok, melyek közül az első az Elasztoplasztikus törésmechanika (Elasto-Plastic Fracture Mechanics) elnevezést kapta. A kezdeti elképzelés az volt, hogy Európába az ASTM International bizottsági szerkezetének mintájára épülő hasonló szervezet jöjjön létre. Az Európai Szerkezetintegritási Társaság első elnöke Dr. L. H. Larsson (Európai Bizottság Közös Kutatóközpont) volt. Az ESIS-nek összesen 24 műszaki bizottsága van, és az egyes európai országokban különböző nemzeti csoportok szerveződtek.

A szerkezetintegritás, mint fogalom ESIS szerinti definíciójának értelmében, a szerkezetintegritás a tudomány és technológia azon területeit aknázza ki, amelyek a biztonságos üzemelés és a meghibásodás közötti tartomány (safety margin) elemzését szolgálják.

Az ESIS konkrét céljai a következők:

- mérnöki anyagok, alkatrészek és szerkezetek mechanikai terhelés alatti meghibásodásának megelőzésére irányuló kutatás és együttműködés elősegítése;
- mérnöki alkatrészek, anyagok és szerkezetek fizikai viselkedésének interdiszciplináris kutatásának ösztönzése;
- új vizsgálati módszerek, numerikus módszerek és mérnöki becslési módszerek kifejlesztése a szerkezeti integritás értékelésére vonatkozóan;
- a mérnöki tervezés módszertanának és folyamatának javítása;
- a gyártási, ellenőrzési és karbantartási eljárások javítása;
- anyagtulajdonságokra vonatkozó adatok értelmezési módszereinek, valószínűségi értékelésének és a meghibásodások megelőzésére és kezelésére szolgáló eszközöknek a kifejlesztése;
- ismeretek terjesztése tudományos publikációk, eljárási dokumentumok és adott esetben a nemzeti és nemzetközi szabályozókészítő testületek felé történő továbbfejlesztés révén;
- fiatal mérnökök és kutatók oktatása és fejlesztése a szerkezeti integritással kapcsolatos kérdésekben.



European Structural Integrity Society

Tagság - előnyök:

Az ESIS egyéni, szervezeti és vállalati tagsággal rendelkezik. A tagok regisztrálhatnak egyéni tagként (egyéni regisztráció) vagy egy megnevezett ipari, kereskedelmi, kutatási vagy oktatási szervezet csoportos tagságának részeként az éves díj megfizetésével (vállalati vagy nemzeti bizottságok regisztrációja).

Az ESIS tagság előnyei:

- Teljes körű online hozzáférés az ESIS kiadványarchívumhoz.
- Teljes körű online hozzáférés a korábbi, már nem nyomtatott EGF-ESIS könyvekhez.
- Saját ESIS gmail-es email cím és hozzá tartozó 30 Gb-os tárhely a szokásos 15 Gb helyett.
- Kedvezményes részvétel az ECF rendezvényeken (konferencia és nyári iskolák).
- Havonta érkező „ESIS hírek”, az ESIS, az ESIS Műszaki Bizottságai (TC) és Nemzeti Bizottságai által szervezett eseményekkel.
- Félévente érkező ESIS hírlevél, amely tartalmazza a Műszaki Bizottságok és a Nemzeti Bizottságok tevékenységéről szóló jelentéseket, valamint az ESIS működésével kapcsolatos összes információt.
- Tagság az Ön Nemzeti Bizottságában.
- Részvétel az ESIS Round-Robin tesztprogramokban.

Ezen kívül lehetőség van az alábbiakra:

- Különböző témákra összpontosító Műszaki Bizottságok tevékenységeiben való részvétel.
- Az *iMechanica* blogján való publikálás, amely elősegíti és intenzívebbé teszi a mérnöki törésmechanika legújabb publikációival kapcsolatos releváns tudományos vitákat, információcserét.
- *YouTube*-csatorna az ESIS által nemrégiben szervezett események videofelvételével (ECF előadások és Nyári iskolák felvételei).
- A *Procedia Structural Integrity* (Elsevier) kiadvány hozzáféréseinek biztosítása, amely teljes egészében az ESIS, az ESIS Műszaki Bizottságainak és az ESIS-hez kapcsolódó Nemzeti Bizottságok által szervezett konferenciaanyagok teljes sorozatának kiadására összpontosít.

Honlap: <https://www.structuralintegrity.eu/site/>



European Conference on Fracture ECF23, 2022

Fracture Mechanics and Structural Integrity, June 27 – July 1, 2022

SPONSORED BY ESIS - EUROPEAN STRUCTURAL INTEGRITY SOCIETY



Summer School

Fracture Mechanics and Structural Integrity 25th – 26th June 2022, Funchal, Portugal

SPONSORED BY ESIS - EUROPEAN STRUCTURAL INTEGRITY SOCIETY

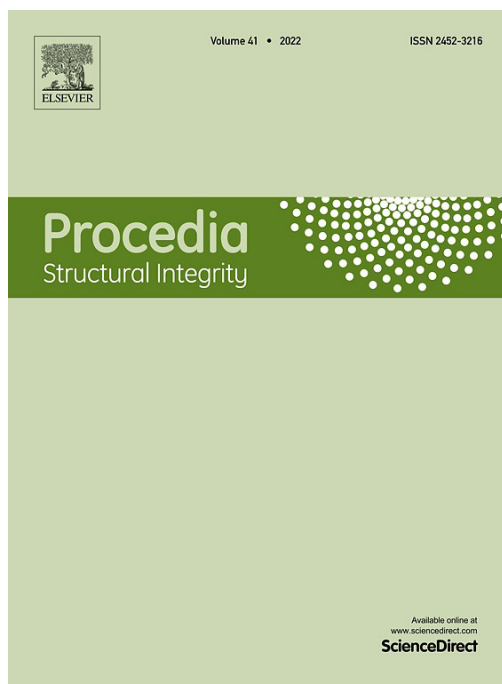
- Naprakész [weboldal](#) és közösségi platformok: [Facebook](#), [Telegram](#), [Twitter](#), [Linkedin](#), [Youtube](#).
- Különszámok megjelentetése négy kapcsolt Elsevier folyóiratban: Engineering Failure Analysis, Engineering Fracture Mechanics, International Journal of Fatigue, Theoretical and Applied Fracture Mechanics.

Az ESIS fő rendezvénysorozata a European Conference on Fracture (ECF) két évente kerül megrendezésre, melynek idén (sorozatban 23. alkalommal) Portugália ad otthont. Az ECF-en kívül a nemzeti bizottságok és/vagy a műszaki bizottságok néhány napos, ún. iskolákat szerveznek (pl. nyári, őszi, téli iskola), amelyek elsősorban PhD hallgatóknak, fiatal kutatóknak és mérnököknek szólnak, de mindenki számára nyitott és látogatása ajánlott.

Idei rendezvényeik:

- **European Conference on Fracture (ECF)**
 - ECF23, 2022. június 27-július 1., Funchal, Madeira, Portugália
- **Summer Schools**
 - ISCID keretein belül, Kifáradás és a törés modellezése és elemzése témakörben, 2021. szeptember 6-7., Dubrovnik
 - ECF23 keretein belül, 2022. június 25-26., Funchal, Madeira, Portugália

Kiadvány: *Procedia Structural Integrity*



Műszaki Bizottságok:

Az ESIS műszaki bizottságai a szerkezeti integritás különböző aspektusaival foglalkoznak. Ezek az ESIS szervezetének legfontosabb részét képezik. Tevékenységüket az ESIS támogatja. Az egyes műszaki bizottságok erejét a bizottsági tagok száma és tudományos minősége, valamint a jelentések, ajánlások, eljárási dokumentumok, különleges műszaki kiadványok és a műszaki ülések rendszeresége jelzi. Ahol csak lehetséges, a műszaki bizottságok témája interdiszciplináris szempontokat is magában foglal. Az egyes TC-k több albizottságra oszthatók, amelyek mindegyike a fő témakör speciális aspektusait vizsgálja.

TC1	Elastic Plastic Fracture Mechanics	Képlékeny-rugalmas törésmechanika
TC2	Micromechanisms	Mikromechanizmusok
TC3	Fatigue of engineering materials and structures	Mérnöki anyagok és szerkezetek kifáradása
TC4	Polymers, Polymer Composites and Adhesives	Polimerek, polimer kompozitok és kötőanyagok
TC5	Dynamics of Fracture and Structural Transformation	A törés és a szerkezeti változások dinamikája
TC6	Ceramics	Kerámiák
TC7	Failure Analysis and Forensic Engineering	Hibaelemzés és törvénytörési/szakértői mérnöki tevékenység
TC8	Numerical Methods	Numerikus módszerek
TC9	Concrete	Beton
TC10	Environmentally Assisted Cracking	Környezet által támogatott repedések
TC11	High Temperature Mechanical Testing	Magas hőmérsékletű mechanikai vizsgálatok
TC12	Risk Analysis and Safety of Large Structures and Components	Nagyméretű szerkezetek és alkatrészek kockázatelemzése és biztonsága
TC13	Education and Training	Oktatás és képzés
TC14	Integrity of Biomedical and Biological Materials	A biomedicinális és biológiai anyagok integritása
TC15	Structural Integrity of Additive Manufactured Components	Additív eljárással előállított alkatrészek szerkezeti integritása
TC16	Finite Fracture Mechanics	Véges törésmechanika
TC17	Non Destructive Evaluation	Roncsolásmentes értékelés
TC18	Structural Integrity of Welded Joints	A hegesztett kötések szerkezeti integritása
TC24	Integrity of Railway Structures	A vasúti szerkezetek integritása

Hogyan válhat valaki ESIS taggá?

A csoportos tagsági díj: 10 EUR (mely 2022-ben 4 000 HUF, s amit a Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség (MAROVISZ) szed be és intéz a nemzetközi szervezettel.) A tagsági díjat az alábbi számlaszámra szükséges megküldeni, figyelve a megjegyzés rovatra:

Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség

K&H Bank 10200830-32323070-00000000

A megjegyzés rovatban kérjük beírni: ESIS tagdíj 2022 + név

Szávai Szabolcs, Trampus Péter
a Magyar Nemzeti Bizottság titkára és elnöke

A Vasipari Kutató Intézet 70 éves-jubileuma (1952-2022) – II. rész

70th anniversary (1952-2022) of the Research Institute for Ferrous Metals – Part II.

Fehérvári Attila

Az előző számban összefoglaltuk a VASKUT történetét¹ 1973-ig. További történetére hatást gyakoroltak az ország határain kívüli, magyar vonatkozású események is, ezért célszerű azokat röviden összefoglalni.

Kialakult egy hasznos együttműködés a csehszlovák hegesztési kutató intézettel (VÚZ-Bratislava), amelyet Zorkóczy professzor úrnak és a VÚZ igazgatójának, Jozef Čabelka professzor úrnak a barátsága alapozott meg.

Létrejött együttműködés az NDK Központi Hegesztési Intézete (ZIS-Halle) és a GTE között, amelynek eredményeként sok magyar szakember szerzett hegesztőmérnöki képesítést (Schweisserpass) a ZIS tanfolyamain.

Az orosz műszaki irodalom is hatást gyakorolt a magyar hegesztési kultúrára. 1952-ben kiadták Nyikolajev „Hegesztés” című kézikönyvét. Később Rittinger János nomogramot szerkesztett a varrat alatti repedések elkerülésére, a hegesztési hőfolyamat Rükalin által publikált differenciál egyenlete alapján.

1959 és 1963 között Romvári Pál aspiráns volt a Moszkvai Bauman Egyetemen, ahol – a titán hatásának vizsgálatáról írt értekezésével – kandidátusi fokozatot szerzett. (Előzőleg, 1945-1951 között szakmunkás képesítő vizsgákat és szakérettségi vizsgát tett. 1951-1956 között a BME Hadmérnöki Karán tanult, és szerzett diplomát. A forradalom után tanársegéd lett a Mechanikai Technológiai Tanszéken).

1963-1966 között docens, és tanszékvezető helyettes a Gillemot tanszéken. Ő tartotta a heti tanszéki értekezleteket, amelyeken félállású tanársegédként jelen sorok írója is részt vett.

1966-1989 között egyetemi tanár a Zorkóczy tanszéken. 1968 szeptemberében – Zorkóczy professzor úr nyugdíjazása után – átveszi a tanszék vezetését. Jelentős fejlesztéseket valósít meg a tanszék szakterületein, a hegesztésben, a hőkezelésben, a képlékeny alakításban és a gépészeti anyagtudományban. Mindeközben fontos közéleti tevékenységet is végez.

Turi Aladár Romvári Pállal együtt volt aspiráns Moszkvában. (Előzőleg a Szabványügyi Hivatalban dolgozott). 1963-ban docenssé nevezték ki az NME Mechanikai Technológiai Tanszékére, azonban hamarosan visszatért a Szovjetunióba, ahol a KGST szabványosításban dolgozott. Megnősült, és letelepedett Moszkvában.

A Szovjetunió rangos egyeteme a Leningrádi Műszaki Egyetem, amelynek egyik alapítója Mendelev volt 1899-ben. Itt tanult Kollár Imre, aki nagy hatást gyakorolt a magyarországi hegesztés történetére.

Az előző számban közölt összefoglalóból kimaradt az a munka, amelyet a VASKUT a lánghegesztés és lángvágás

eszközeinek és technológiájának fejlesztésére végzett. Ugyancsak kimaradt a hegesztő áramforrások fejlesztése. Mindkét témakörben végzett munka – amelyet Fehérvári Attila végzett vagy irányított – hozzájárult a hazai hegesztési kultúra fejlődéséhez.

A Hegesztési Osztály tevékenysége: 1973-1976

Osztályvezető: Dr. Turi Aladár

1973-ban Dr. Turi Aladár áttelepült Magyarországra, hogy tudományos karriert építsen. Munkahelyként a Vasipari Kutató Intézetet, szakterületként a hegesztést választotta, ezért visszaállították a VASKUT Hegesztési Osztályát az ő vezetésével.

A Hegesztési Osztály alapja az Acélmetallurgiai Osztálytól átvett Hegesztési Csoport volt, amelyhez az Anyagvizsgálói Osztályról Dr. Szunyogh László csatlakozott. Udvardi Tibor pedig Beck András ajánlásával került a csepeli hegesztési laboratóriumból a Hegesztési Osztályra.

Szervezetileg a Hegesztési Osztályhoz sorolták át a porbeles huzalgyártó műhelyt, amelyet Ungvárszky Miklós hozott létrehozott az Anyagvizsgálói Osztályon. A műhelyben rajta kívül Szegedi Géza, Tarnainé (Tarján Hedvig) és Bodor Albert dolgozott.

Dr. Turi Aladár három kutató csoportot szervezett:

1. Az acélok fejlesztésével foglalkozó csoportot Dr. Rittinger János vezetésével. Tagjai: Tóth Károly, Kern Ferenc, Takács Gyula.
2. A hegesztőanyagok fejlesztésével foglalkozó csoportot Fehérvári Attila vezetésével. Tagjai: Kern Olga, Udvardi Tibor, Schwarczenberger Pál.
3. A korrózióálló acélok fejlesztésével foglalkozó csoportot Dr. Szunyogh László vezetésével. Tagjai: Zsolgaya Péter, Fogarassy László, György Miklós.

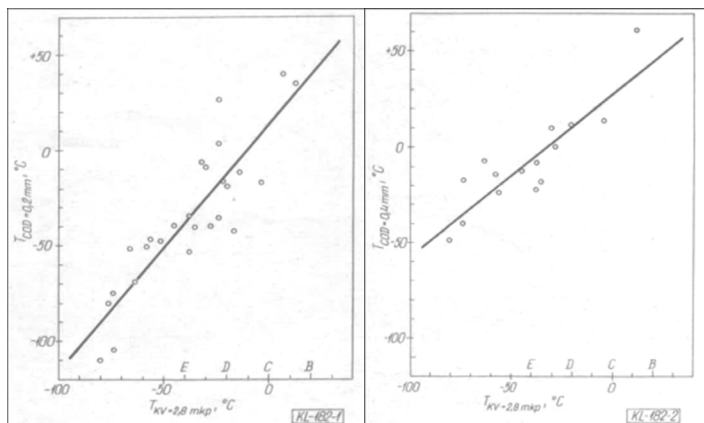
A kutató csoportok számára saját műhely állt rendelkezésre, Megyesi Sándor művezető irányításával. A műhelyben Szabó László hegesztő, Machalek Ferenc lakatos és Dávid László segédmunkás dolgozott. Emellett a társosztályok szolgáltatásai is a kutatók rendelkezésére álltak (próbatestgyártás, vegyelemzés, metallográfia).

1974-ben Dr. Horváth Jánost nevezték ki a VASKUT igazgatójává, aki az Ózdi Kohászati Üzemek munkásaként kezdte pályáját, majd a KGM által 1968-ban létrehozott Magyar Vas- és Acélipari Egyesülés vezérigazgatója lett. Verő professzor úr tanácsadóként az intézetnél maradt 1976-ig, amikor nyugdíjba vonult.

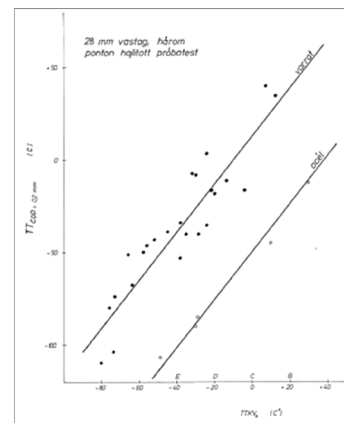
Törésmechanikai kutatások

1970-ben Fehérvári Attila és Dr. Rittinger János alkalmassá tette az Anyagvizsgálói Osztály ALPHA gyártmányú, 30 tonnás mechanikus szakítógépét az ipari

¹ Fehérvári Attila: A Vasipari Kutató Intézet 70 éves-jubileuma (1952-2022) – I. rész, Anyagvizsgálók Lapja 2022/II. lapszám, pp. 60-66. https://avilap.hu/view_article.jsp?article=1261 (Letöltés dátuma: 2022.06.24.)



1. ábra: Szerkezeti acél varratok COD jellemzőjének átmeneti hőmérséklete



2. ábra: Varratok és alapanyagok COD jellemzőinek átmeneti hőmérséklete

gyakorlatban járatos, képlékeny szerkezeti anyagok statikus törésmechanikai anyagjellemzőinek mérésére, három ponton hajlított (TPB) próbatestekkel. A terhelőerő hatásvonalába egy erőmérő cellát, és egy saját tervezésű készüléket építettek be, amely lehetővé tette a próbatest lehajlásának mérését, és a repedés kinyílásának (V) mérését a próbatest felületétől 5 mm távolságban.

A törésmechanikai próbatestekben az Anyagvizsgálati Osztály AMSLER 10 MP és AMSLER 2 MP rezonancia-fárasztó gépekkel hoztak létre repedéseket $\approx 5000/\text{min}$ frekvenciával. A fárasztást megszakítva a felület kékítésével (250°C hőkezeléssel) megjelölték a repedés méretét. A vizsgálati eredményekből meghatározták a repedésterjedés sebességét leíró Paris-Erdogan összefüggés ($da/dN = C\Delta K^m$) paramétereit, és a repedésterjedés küszöbértékét (ΔK_{th}).

A statikus vizsgálatok jeleit $XY Y'$ íróval regisztrálták. A jelek alapján összefüggést határoztak meg a mért repedés kinyílás (V) és a repedés csúcsára átszámított repedés kinyílás (COD) között. Sok száz COD mérést végeztünk, amelyek kiértékelése nagy munka volt, de egyben nagy lépés a törésmechanika meghonosításában.

A COD ismeretében használni tudtuk a Welding Institute (Abington Hall, Cambridge) tervezési görbéit ($\sigma_T/\sigma_Y = f(\varepsilon/\varepsilon_Y)$) a töréssel szembeni biztonság növelésére.

Saját vizsgálatokat is előkészítettünk a tervezési görbék meghatározására azzal az 500 tonnás hidraulikus szakítógéppel, amelyet a Kábelgyár szerzett be az Erzsébet híd kábeleinek ellenőrzéséhez. A vizsgálati program az 1. sz. mellékletben látható. Egy VASKUT vezetői döntés miatt azonban a szakítógép és saját előkészítő munkánk (széles lemez próbatestek és befogók) kárba veszett.

1973-ban készült először számítás a VASKUT Hegesztési Osztályán vastagfalú nyomástartó edény feszültségi állapotának meghatározására. A tartályt a Láng Gépgyár készítette (1/4-2-466/73²). A számítást Fehérvári Attila végezte az ASTM-STP 381 számú kiadványában (1965)

ismertetett módszerrel.

Fehérvári Attila összefüggést határozott meg³ a törésmechanikai anyagjellemzők és az ütővizsgálati anyagjellemzők között.

Az 1. ábra (az ábrák mindegyike a VASKUT dokumentaiban fellelhetők) 20 mm vastag TPB próbatestek átmeneti hőmérsékletének összefüggését mutatja az ütővizsgálat átmeneti hőmérsékletével. A 2. ábrán 28 mm vastag TPB próbatestek átmeneti hőmérséklete látható, összehasonlítva szerkezeti acélok átmeneti hasonló jellemzőjével. Az ábra 50 hegesztett kötés COD vizsgálati eredményeit tartalmazza, amelyből 1200 COD próbatest, 1500 ütő próbatest és 100 szakító próbatest készült.

Az összefüggés birtokában megítélhető egy roncsolásmentes vizsgálattal feltárt repedés vagy más síkbeli hiba veszélyessége. Megállapítható, hogy a síkbeli hibák jelenléte sokkal veszélyesebb a varratban, mint az alapanyagban.

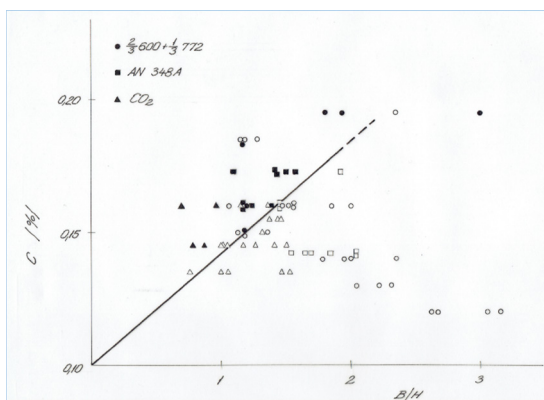
Varrat repedések

1968-ban a győri közúti Rába híd fedettívívű hegesztési varratainak mágneses repedésvizsgálata meglepetésre folytonos repedést tárt fel. A varratok a Magyar Vagon és Gépgyárban gyártott S 45 fedőporral készültek. 3,5 km varratot ki kellett köszörsülni, és bevont elektródával újra kellett hegeszteni. Kutatásokat kezdtek a repedés okainak feltárására.

Fehérvári Attila kutatásai bizonyították, hogy a repedések keletkezése a varrat kristályosodásával hozható összefüggésbe. A folyékony vas–karbon ötvözetből $C < 0,1\%$ esetén térközepes köbös (tkk) kristályrácsú δ -ferrit kristályosodik, $C = 0,1-0,2\%$ esetén pedig δ -ferrit és felületen közepes köbös kristályrácsú (fkk) austenit kristályosodik (egyensúlyi állapotban peritektikus reakció). Az Fe-atom térkitöltése az fkk kristályrácsban nagyobb, így a ferritben oldott elemek egy része vegyületként kiválik, zárványt képez az austenit szemcsék között, amely növeli a repedések keletkezésének veszélyét.

² A zárójelben feltüntetett számok a VASKUT által adott témaszámokat jelentik, mely dokumentumok a mai napig fellelhetők a szerzőnél.

³ Fehérvári Attila: VII. Kohászati Anyagvizsgáló Napok, Balatonszéplak (1973), Fehérvári Attila: Kapcsolat az ütő-hajlító vizsgálat és a COD mérés eredménye között. BKL-Kohászat, 108 pp. 155-158 (1975)



3. ábra: Varratrepedések keletkezésének feltételei

Kísérleteket 30 mm vastag, karbon-mangán acél fedettívű és védőgázos eljárással hegesztett gyökvarratának hegesztésével végeztek. A hegesztési paraméterekkel változtatta a varratok szélességének (B) és mélységének (H) viszonyát. Mély beolvadásnál a szulfidzárványok a zsugorodásra merőlegesek, növelve ezzel a repedések valószínűségét. A vizsgálatok eredményét a 3. ábra foglalja össze. A varratrepedések elkerülésére nomogram készült, amelyet a VASKUT felhasznált az ipari megbízásra kidolgozott hegesztési technológiák tervezéséhez.

KGST együttműködések

1973-ban létrejött a Hegesztési Egyezmény a KGST országokban folyó kutatások összehangolása és a kutatók tapasztalatcseréje céljából (száma: 1.13). A tagországok képviselőit szakértők (experte) látták el, Magyarországot Romvári Pál professzor képviselte.

A kutatásokat specialisták végezték különböző témákban. A VASKUT négy téma munkájában vett részt: Fehérvári Attila vezetésével az 1.13-7 (porbeles huzalok) és az 1.13-14 (hegesztőanyagok) témában, Dr. Rittinger János vezetésével pedig az 1.3-12 (rideg törés) és az 1.13-19 (hegeszthetőség) témában.

A hegesztési egyezménnyel párhuzamosan megkezdődött az anyagvizsgálat módszereinek és eszközeinek összehangolt kutatása is (száma: 1.35). A VASKUT az 1.35-3 (törésmechanika) specialistáinak munkájában vett részt Fehérvári Attila vezetésével. Az 1-35-3 téma koordinátora Milan Brumovszky volt.

A KGST együttműködés a kétoldalú együttműködések helyébe lépett.

Hegesztőanyag fejlesztések

1974-ben KGM megbízást adott a „Hegesztőanyaggyártás megújítása” című téma kidolgozására (4-1-520/74-77) amely Dr. Turi Aladár vezetésével, Fehérvári Attila, Udvardi Tibor, Schwarzenberger Pál részvételével valósult meg. A téma keretében megvalósítandó feladatok a következők voltak:

1. Igényfelmérés, választékajánlás.
2. Alapanyag (ø6 mm OKÜ hengerhuzal), előhúzás (ø2,5 mm SKÜ huzal) hatásának vizsgálata CO₂ védőgázos huzalok tulajdonságaira.

3. Szovjet porbeles huzalok (PP AN 3, PP AN 7, PP AN 8) vizsgálata.

1975 márciusában az Eurocom (Gyarmat utca) főosztályvetetője, Nagy Sándor találkozót szervez a VASKUT épületébe – Fehérvári Attila és az ESAB szakemberei között, a Csepel Fémű szakembereinek részvételével – 12 bevont elektróda és 2 ragasztott fedőpor licencvásárlási ajánlatának megbeszélésére. Fehérvári Attila tanulmányozza a hegesztőanyaggyártást Göteborgban és a gépgyártást Laxában.

1975 júniusában Turi Aladár vezetésével Fehérvári Attila és két salgótarjáni szakértő tanulmányozta a porbeles huzalgyártás technológiáját, gyártását, és berendezését. Állomások: Kijev - Makajevka - Moszkva - Alma Ata - Moszkva.

A korrózióálló acélok fejlesztésével foglalkozó kutatócsoport az ERBE megbízásából Dr. Szunyogh László vezetésével átfogó tanulmányt készített atomerőművi hegesztett szerkezetek erősen ötvözött acél anyagainak és hegesztett kötéseinek tulajdonságai címmel (4-2-662/75).

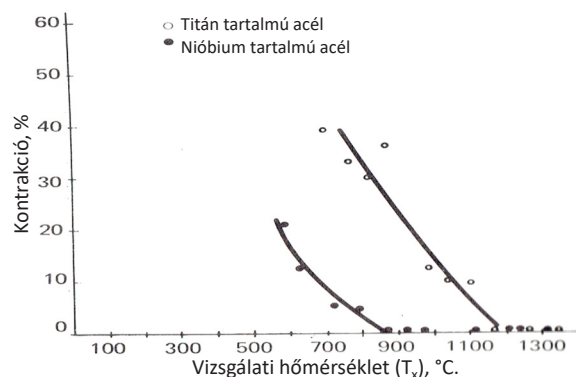
1976-ban a hegesztőanyagok fejlesztésével foglalkozó kutatócsoport a Csepeli Fémű megbízásából Fehérvári Attila vezetésével összehasonlító vizsgálatot szervezett a Mórion létesítendő hegesztőanyaggyár termékvalasztékának kialakítására (4-2-865/76).

A vizsgálatokban az ESAB, a BOC és a Csepeli Elektrodagyár termékeit hasonlították össze.

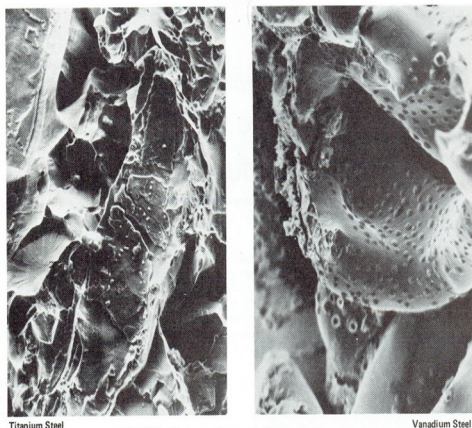
A vizsgálat kiterjedt a technológiai tulajdonságokra és a varrat-tulajdonságokra. A vizsgálatokban részt vettek a hegesztést alkalmazó legnagyobb hazai vállalatok és a műszaki egyetemek, és rajtuk keresztül a legtöbb jelentős hazai hegesztő szakember.

Microalloying'75

1975-ben az Union Carbide Corporation nemzetközi szimpóziumot szervezett Washingtonban (DC), a növelt szilárdságú gyengén ötvözött acélok fejlesztésének áttekintése, és alkalmazásának elősegítése érdekében. A szervező bizottság pályázatot hirdetett előadás benyújtására azzal az elkötelezettséggel, hogy a nyertes pályázó utazási és részvételi költségét a szimpózium költségvetése fedezi. Dr. Rittinger János és Fehérvári Attila sikeresen pályázott, így részt vehetett a szimpóziumon. Szenzáció



4. ábra: Hőszimulátorban elszakított próbatestek kontrakciója



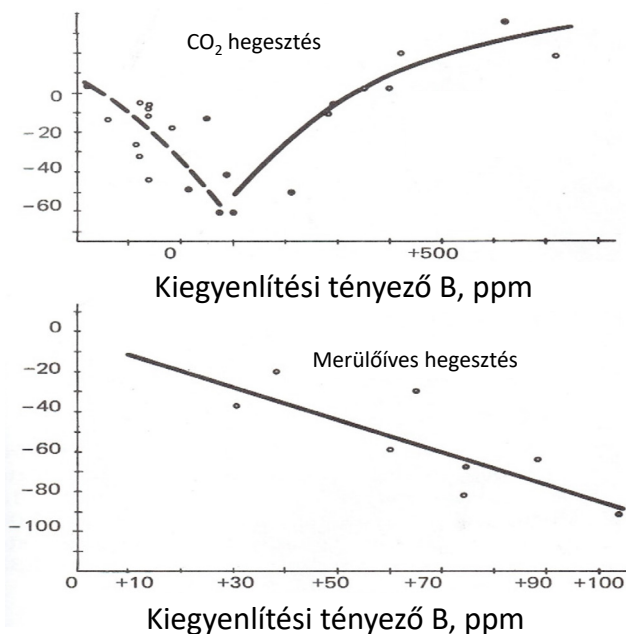
5. ábra: Hőszimulátorban 1375 °C hőmérsékleten elszakított próbatestek töretfelülete

volt, mert korábban műszaki kutató nem járt az Egyesült Államokban.

A 4. ábra hőszimulátorban elszakított, 1,0 % Mn tartalmú acél próbatestek kontrakcióját mutatja a szakítási hőmérséklet függvényében. Látható, hogy nióbium tartalmú (500ppm) acél 850 °C hőmérsékleten, a titán tartalmú (600ppm) acél 1200 °C hőmérsékleten ridegen törik. A vanádium tartalmú acélok 1375 °C hőmérsékleten is kontrahálnak. Az 5. ábrán a titán és a vanádium tartalmú acélok töretfelületének scanning elektron mikroszkópos képe látható.

A rideg viselkedés minimum hőmérséklete összefüggést mutat a szubsztitúciós elemek és a vas atomátmérőjének különbségével.

A szimpóziumot több élménybeszámoló és szakmai publikáció követte. Az első híradás Dr. Rittinger János, Fehérvári Attila: Mikro ötvöző elemek hatása szerkezeti acélok szívósságára című közleménye volt⁴.



6. ábra: Varratok átmeneti hőmérséklete

Az IIW dokumentum hatására megkezdődött az egyetlen, magyar kutatások nyomán született, nemzetközi kutatási program, amelyben számos ország vett részt (Japán, Egyesült Királyság, Franciaország, NSZK, Svájc). Az IIW felajánlotta Magyarországnak a program megszervezését és lebonyolítását, amelyre Konkoly professzor bejelentkezett, majd éveken át részt vett a közgyűléseken, az évközi üléseken és a munkaértekezleteken (az ötletgazdák nem érte veszteség, hiszen az ő utazásait nem támogatta volna senki).

A 6. ábra és a 7. ábra a varratok átmeneti hőmérsékletét mutatja az 1972-ben bevezetett, és idő közben kibővített kiegyenlítési tényező (B) függvényében.

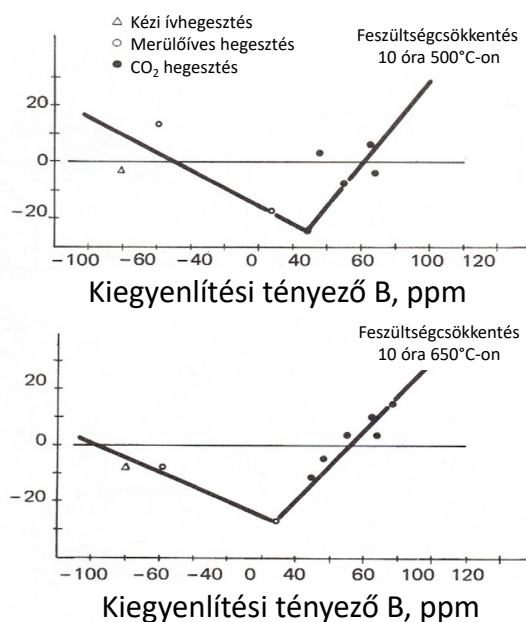
$$B = \frac{14}{27}Al + \frac{14}{48}Ti + \frac{14}{51}V + \frac{14}{93}Nb - N$$

Atomerőművi kutatások kezdete

Egy 1966-ban kötött államközi egyezmény értelmében Magyarország négy atomerőművi blokk szállítását rendelte meg a Szovjetuniótól. A blokkok VVER 440 MW reaktort tartalmaztak, amelynek tartályát a pilseni Skoda Művek gyártotta. A tartályba 275 °C hőmérsékletű víz lép be, amit a sugárzás 315 °C hőmérsékletűre melegít 123 bar nyomáson. A primer körbe 6 db szovjet gőzfejlesztőt, a szekunder körbe 2 db 220 MW teljesítményű, a Ganz Villamossági Művek által gyártott gőzturbinát építettek be. A belépő gőz nyomása 44 bar, hőmérséklete 255 °C volt.

1976. január 1-jén létrejött a Paksi Atomerőmű Vállalat. Az érvényben lévő szovjet előírások szükségessé tették egy vezető tudományos intézmény kijelölését. A feladatot a VASKUT kapta meg, amely a tevékenység irányítását Dr. Szunyogh Lászlóra bízta.

A Hegesztési Osztály sikeres működésének elismerésére Dr. Turi Aladár feljebb lépett a VASKUT ranglétráján.



7. ábra: Hőkezelés hatása a varratok átmeneti hőmérsékletére

⁴ Gép XXVIII. évf. pp. 267-272 (1976), BKL-Kohászat 110. évf. pp. 343-348 (1977), XII-B-231-77 (IIW)]

Az osztály vezetésével a vezető tudományos intézményi feladatok irányítóját, Dr. Szunyogh Lászlót bízták meg.

A Hegesztési Osztály tevékenysége: 1976-1980

Osztályvezető: Dr. Szunyogh László

Megszűntek a kutató csoportok, és új munkatársak kerültek az osztályra: Deák Csaba, Takácsné (Márkus Enikő), Gál Ilona, Boross Péter, Szántó László, Madár Pálné (Éva), Pilc Erzsébet.

Vezető tudományos intézményi feladatok (1976-1980)

1976-ban vizsgálatsorozat kezdődött a szovjet hegesztőanyagok kiváltására és az alkalmazandó hegesztéstechnológia minősítésére (4-2-858/76). 1979-ben új vizsgálatsorozat indult hasonló céllal (8-2-1292/79). A vizsgálatokat különböző kutatók végezték, a téma vezetője Dr. Szunyogh László volt. Munkájuk eredményeként egy terjedelmes technológiai adatbázis jött létre.

1976-tól a VASKUT több eredménytelen kísérletet tett reaktortartály anyag beszerzésére saját kísérletek céljából. Saját kezdeményezésű kutatás keretében 4 laboratóriumi adagot is gyártott. 1978-ban – egy ERBE (Kristyák Ernő) szerződés alapján – a VASKUT megrendelte egy 50 tonnás adag gyártását az LKM elektroacél kemencéjében. Az adag összetétele 0,13 C, 3,0 Cr, 0,52 Mo, 0,24 V volt. Az adagot ~5 tonnás kokillákba öntötték, az öntecsekből 180x550x1500 mm méretű lapokat sajtoltak, és 220x600x1500 mm lemezbugákat hengereltek.

A sajtolt lapokból nemesítés után próbatesteket gyártottak a reaktortartály 15H2MFA anyagának vizsgálatához, és hegesztett kötések készítették a reaktortartály körvarratainak vizsgálatához. A hegesztett kötések a SKODA Művektől származó SZV 10HMFT huzallal (0,10 C, 1,7 Cr, 0,5 Mo, 0,27 V) és AN42 fedőporral készültek. Megjegyezzük, hogy a SKODA Művekben 45 tonnás öntecsek készültek, amelyek nagyobb átkovácsolási mértéke miatt a reaktortartály anyagok saját vizsgálati eredményei tájékoztató adatok. A kísérleti anyagok biztosítását Dr. Rittinger János szervezte.

A lemezbugákból 80 mm vastag lemezeket hengereltek a Lőrinci Hengerműben. Ebből készült a reaktor modelltartály a Csepeli Egyedi Gépgyárban. A plattírozást SANDVIK 3RE41 (0,03 C, 24,5 Cr, 12,5 Ni, 0,78 Nb) és 3R42 (0,03 C, 21,0 Cr, 10,4 Ni, 0,60 Nb) szalaggal végezték. A csonkot a Ganz MAVAG gyártotta, és hegesztette be a tartályba. Az elkészült tartályt a Láng Gépgyár hőkezelt. A modelltartály gyártását Fehérvári Attila szervezte.

Bevont elektródák és fedőporok gyártása

1976-ban a Csepeli Fémművek és a VASKUT szerződést kötött ESAB és BOC elektródák, valamint ESAB fedőporok vizsgálatára a mőri elektródagyár termékvalasztekának kialakítása céljából (8-2-865/76-77). A téma vezetője Fehérvári Attila volt.

A vizsgálatokkal meghatározták a technológiai tulajdonságokat (alkalmazhatóság különböző hegesztési

helyzetekben, beolvadási mélység, alkalmasság vékony lemez hegesztésére, résáthidaló képesség, alkalmasság, sarokvarratok hegesztésére, felületi rozsdára és egyéb szennyezésre való érzékenység, salakleválás, gyújtás könnyűsége, fröcskölés), a varratulajdonságokat (mechanikai tulajdonságok, repedésérzékenység), és a technológiai feltételeket meghatározó tulajdonságokat (varrat hidrogéntartalma, füstképződés, minimális üresjáratifeszültség, szárítás szükségessége, hőmérséklete).

A technológiai feltételeket meghatározó tulajdonságok vizsgálatára Udvardi Tibor készüléket szerkesztett a diffúzióképes hidrogéntartalom mérésére, valamint a füstképződés mennyiségének és összetételének meghatározására. Saját mérések, valamint az egészségügyi előírások egybevetésével határozták meg a szellőztető ventilátorok teljesítményét a Metro Nyugati téri mélyálmás építéséhez.

A vizsgálatokban és/vagy az eredmények megbeszélésében részt vettek a hegesztést alkalmazó legjelentősebb hazai vállalatok, és intézmények szakemberei:

Gyenes József, Kopasz Lajos és Stitz Béla, Longa Péter (Csepeli Fémművek), Beck András (Csepeli Egyedi Gépgyár), Vízkeleti Kálmán (Vegyiműveket Építő és Szerelő Vállalat), Réthfalvi Ferenc (Kohászati Gyárépítő Vállalat), Domanovszky Sándor, Lehoczky Csaba és Konkoly Tege Csaba (Ganz MAVAG), Zsolgya Péter, Koltay Gábor (Láng Gépgyár),

Dr. Brenner András, Angyal Béla (Magyar Hajó és Darugyár), Stelke László (Budapesti Vegyipari Gépgyár), Megyeri Béla (Magyar Vagon és Gépgyár, Győr), Székely Ferenc (Budapesti Kőolajipari Gépgyár), Pintér Bertalan (Április 4 Gépipari Művek), Scsaurszki Tamás és Hajagos János (Kőolajvezeték Építő Vállalat), Dömötör Zoltán (Csőszerelő Ipari Vállalat), Dr. Szokol György (EUROCOM), Dr. Konkoly Tibor, Dr. Bauer Ferenc és Dr. Bödök Károly (BME), Komócsin Mihály, Török Imre (NME), Szentiványi Ede (GTI).

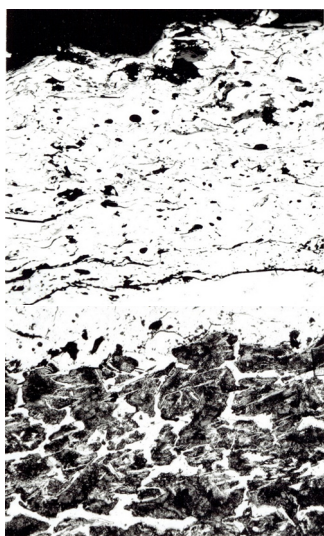
A téma eredményei alapján kezdődött meg a hazai elektróda és fedőporgyártás, amely a mai napig változatlan.

Fémszórás

1976-ban a Papíripari Vállalat megbízásából a VASKUT (Fehérvári Attila) technológiát dolgozott ki a lábatlani gyáregységben működő gépsor 5010 mm átmérőjű és 4800 mm széles, öntöttvas szárítóhengerének felújítására. A felújítás azért vált szükségessé, mert a henger egyenetlen kopása a papír felületére átmásolódott.

Új szárítóhenger öntésére – a nagy méretek miatt – Magyarországon nem volt lehetőség, importja óriási költséggel és idővesztéssel járt volna, ezért a VASKUT más megoldást javasolt. Fémszórással végzett kísérleteket egy öntöttvas hengeren, amelynek eredménye a 8. ábrán látható. Az öntöttvasra mechanikus felületdurvítás után egy Mo átmeneti réteg, arra pedig egy 0,40 % C, 12,8 % Cr, 4,2 % Mo tartalmú kopóréteg került.

Kiválasztották a fémszórás eszközeit, és meghatározták a technológiáját. A szárítóhenger felújítását kiserelés nélkül, teljes sikerrel végezték el.



8. ábra: A fémszört réteg szerkezete

A szárítóhenger felújítása innovatív és eredményes munka volt, amelyért a megrendelő köszönőlevelet küldött.

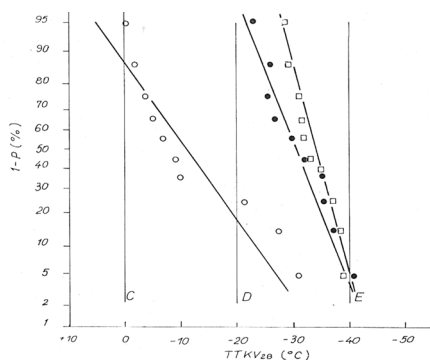
Védőgázos huzalok gyártása

1977-ben a VASKUT szerződést kötött a Salgótarjáni Kohászati Üzemek által gyártott védőgázos huzalok (VIH-2) approbálására és minőségbiztosítására. (A gyártóberendezés 12 gépsorból állt, amelyet az SKÜ 1973-ban vásárolt meg az ESAB cégtől). A téma száma 8-2-919/77-80, a témavezető Fehérvári Attila és Udvardi Tibor volt.

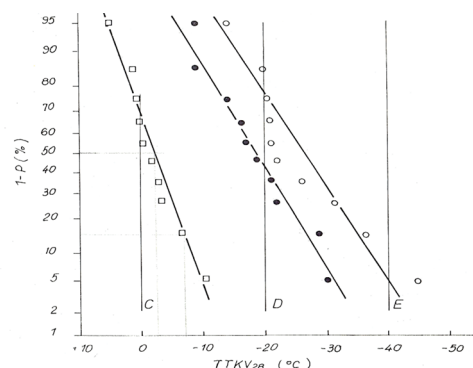
A VASKUT 10 adag felhasználásával készült ömledék és hegesztett kötés (12mm) vizsgálatát végezte el. 1,2mm átmérőjű huzallal 18 varratsorból álló ömledék és 4 varratsorból álló hegesztett kötés (160A), 1,6mm átmérőjű huzallal 8 varratsorból álló ömledék és 2 varratsorból álló hegesztett kötés (380A) készült. A vizsgálati eredmények a 9. ábrán és a 10. ábrán láthatók.

Megállapítható, hogy a hegesztett kötések szívósabban – különösen a lágyacél alapanyag esetén – az ömledéknél (katalógusban szereplő adat).

1977-ben az intézet Vasipari Kutató- Fejlesztő Vállalatát alakult át. Fokozatosan gyártási tevékenységek szerveződtek: zagyvarónai telephely, permanens mágnesek gyártása.



9. ábra: 1,2mm átmérőjű, VIH-2 huzalokkal hegesztett varratok átmeneti hőmérsékletének átlagértéke. Balról jobbra: ömledék, lágyacél hegesztett kötése, C+Mn acél hegesztett kötése



10. ábra: 1,6mm átmérőjű, VIH-2 huzalokkal hegesztett varratok átmeneti hőmérsékletének átlagértéke. Balról jobbra: ömledék, lágyacél hegesztett kötése, C+Mn acél hegesztett kötése.

Módszer és készülékfejlesztés a hegesztőanyagok technológiai tulajdonságainak vizsgálata

A hegesztőanyag-gyártás rekonstrukciójának keretében – egyéb tulajdonságok mellett – bevezettük a diffúzióképes hidrogéntartalom vizsgálatát, valamint a füst és gázfejlődés mennyiségének és összetételének vizsgálatát. A füstképződés mérése alapján határoztuk meg a Metro Nyugati pályaudvari mélyállomásának, majd különböző ipari csarnokok szellőztetéséhez szükséges ventilátorok teljesítményét.

Kopásálló rétegek felrakó hegesztése

1977-ben a Magyar Vas és Acélipari Egyesülés megbízást adott a VASKUT számára kohászati berendezések gyártásánál és javításánál alkalmazott hegesztési technológiák fejlesztésére. (4-2-987/77-79). Témavezető Dr. Tóth Károly volt. Létrehozott egy technológiai példátartat a KGST Vaskohászati Állandó Bizottság által átadott technológiai műveletlapok felhasználásával. A műveletlapokat a felrakó hegesztőanyagok IIW csoportosítása (2. sz. melléklet) szerint rendezte. Ismertette a koptató vizsgálati módszereket és a különböző módszerekkel mért keménység kölcsönös átszámítását.

Egyidejűleg a VASKUT Ungvárszky Miklós által vezetett csoportja porbeles huzalokat gyártott – fedettívű eljárással történő – felrakó hegesztéshez (8-2-914/77-80). Részt vett a GTI által vezetett A-K6-2016-59 programban, amelyben porbeles szalagelektrodákat fejlesztettek ki felrakó hegesztéshez. A porbeles felrakó hegesztő huzalok és szalagok nagyrészt a Dunai Vasmű vásárolta meg és használta fel.

Akusztikus emissziós vizsgálatok kezdete

1978-ban a KFKI- AEKI megbízásból akusztikus emissziós vizsgálatokba kezdtünk TPB próbatestekkel, Alpha 30Mp szakítógéppel. Saját eszközeinkkel mértük és regisztráltuk a lehajlást és a repedés kinyílását, a KFKI pedig az AE jelek gyakoriságát, amplitúdóját és csillapodását (oszcilláció). Ez volt az első lépés az AE vizsgálat meghonosításában.

1. sz. melléklet: Az első törésmechanikai kutatások

Saját „wide plate test” program (alapanyag: 52 kp/mm² szilárdságú szerkezeti acél, ER8 bevont elektróda, vizsgálati hőmérséklet: -20 °C).

A-A metszet	500		500		mérés
	t	t ₁ / t	t	t ₁ / t	
	20	0,3			$M_p(t)$ $\epsilon_c'(t)$ $\epsilon_c(t)$
	20	0,3			$M_p(t)$ $\epsilon_c'(t)$ $\epsilon_c(t)$
	20 20	0,3 0,5			$M_p(t)$ $\epsilon_c'(t)$ $\epsilon_c(t)$ $\sigma_c(t)$
	20 ⁺ 30	1 1	20	1	$M_p(t)$ $\epsilon_c'(t)$ $\epsilon_c(t)$ $\sigma_c(t)$
+ hegesztési technológia változik / EB1, BBC 600+NE 5, AN 3/48 A + FMn 2, V 1 / hőmérséklet változik / -40 °C, +20 °C /					

2. sz. melléklet: Felrakó hegesztőanyagok

Csoportosítás IIW szerint (1977)

	csoport	felrakott varrat vegyi összetétele	keménység
A	ötvözetlen acél	C: 0,4 % alatt	40 HRC
B		C: 0,4 % fölött	60 HRC
C	ausztenites mangánacél	0,5-1,2 % C, 11-16 % Mn	50 HRC
D	ausztenites króm-nikkel acél	13-30 % Cr, 5-25 % Ni, 1-8 % Mn, Ti/Nb	40 HRC
E	króm-acél	max. 2 % C, 5-30 % Cr, Mn, Ni, W, V, Mo	45 HRC
F	gyorsacél	0,6-1,5 % C, 4-6 % Cr, 1,5-1,8 % W, max. 3 % V, max. 10 % Mo, max. 15 % Co	62 HRC
G	nagy króm-tartalmú nyersvas	1,5-5 % C, 25-35 % Cr, max. 5 % W, max. 1 % V, max. 1,5 % Ti, max. 1,5 % B, max. 6 % Mn, max. 4 % Ni, max. 3 % Mo, max. 5 % Co	60 HRC
H	króm-wolfram hőálló acél	0,2-0,5 % C, 1-5 % Cr, 1-10 % W, 0,15-1,5 % V, max. 4 % Mo	45 HRC
N	króm-wolfram tartalmú kobalt ötvözet	0,7-3 % C, 30-70 % Co, 25-33 % Cr, 3-25 % W, 6 % Fe, max. 3 % Ni, max. 3 % Mo	40 HRC
Qa	króm-bór tartalmú nikkel ötvözet	max. 1 % C, 65-85 % Ni, 8-18 % Cr, 2-5 % B, 2-5 % Si, 1-1,5 % Co	55 HRC
Qb	molibdén tartalmú nikkel ötvözet	max. 0,12 % C, 60-80 % Ni, max. 18 % Cr	200 HB
P	zsugorított szemcséjű karbid hordozóanyagban	3 % C, 45 % W	67 HRC

VASKUT porbeles huzalok fedettívű hegesztéshez (AN 348A, előmelegítés ötvözetből és mérettől függően: 200-400 °C)

jel	alkalmazás	vegyi összetétel	keménység
D-325-375	darukerekek, görgők	0,10-0,13 C, 1,7-2,5 Cr	HV 325-375
H-400	kohászati blokkosori hengerek	0,14-0,16 C, 5,5-6,0 Cr, 1,0-1,5 Mo, 1,0-1,5 W	HV 370-420
H-500	meleghengerművi hengerek nagyolvasztó zárószervezet	0,26-0,29 C, 5,0-6,5 Cr, 1,0-1,5 Mo, 0,3-0,5 V, 1,0-1,5 W	HV 470-520
K-500		0,26-0,30 C, 5,0-7,0 Cr, 1,5-2,5 Mo, 0,3-0,5 V, 1,2-2,0 W	
H-55-60		0,30-0,34 C, 5,0-7,0 Cr, 2,0-3,0 Mo, 0,3-0,5 V, 1,5-3,0 W	HRC 55-60

VASKUT-GTI porbeles szalagelektrodák fedettívű hegesztéshez (AN 348A, előmelegítés ötvözetből és mérettől függően: 200-400 °C)

jel	alkalmazás	vegyi összetétel	keménység
PS-H1	meleghengerművi hengerek nagyolvasztó zárószervezet	0,27-0,28 C, 5,7-5,8 Cr, 1,2-1,3 Mo, 0,4-0,5 V, 1,4-1,5 W	HV 500-550
PS-K1		0,27-0,29 C, 5,7-5,9 Cr, 2,6-2,7 Mo, 0,3-0,5 V, 1,6-1,7 W	
PS-D1	darukerekek, görgők	0,12 C, 2,2 Cr	HV 340-390
PS-B1	földgyaluk, markoló serlegek, markoló fogak	2,3 C, 2,2 Cr, 2,8 Mn, 0,5 Mo, 0,5 V, 0,3 W	HV 540-700

A Magyar Anyagvizsgálók Egyesületének 2022. évre szóló munkaterve

1. Jártassági vizsgálatok

- a) A MAE a WESSLING Kft.-vel kialakított együttműködésében csak akkor rendez jártassági vizsgálatot, ha arra valós igény van, és kellő számú résztvevő jelentkezése garantálható.
- b) Esetlegesen elindítható Qualco–MAE-jártassági vizsgálatok kellő számú résztvevővel való lebonyolításával szükséges felmérések, egyeztetések és előkészítések elvégzése.
- c) Azt is felmérjük, hogy hajlandók-e a hazai laboratóriumok (elsősorban a MAE tagok) megadni a meglévő akkreditációiknak a lényeges nyilvántartási adatait. Ez lehet az alapja az előre tervezésnek

2. Szakmai napok, Laborvezetők Fóruma rendezvény, online munkacsoportok kialakítása

- a) Az anyagvizsgálati szabványok területén elkezdett aktivitás folytatása, elnökségi üléseken való megvitatása, ennek a tevékenységnek a kiterjesztése. Ezt a munkát online felületekre helyezzük át, és tématerületeket jelölünk ki, az egyesület fő szakmai irányai mentén. A tevékenységet összehangoljuk más szakmai szervezetek hasonló tevékenységével.
- b) Online fórumok és munkacsoportok létrehozása célfeladatokra, pl. a laboratóriumok akkreditálása, érdemi tagsági részvétellel. Laboratóriumi akkreditálási ügyekben konzultációs fórum létrehozása.

3. A következő *AGY Konferencia* előkészítése és megrendezése

A 11. AGY és a RAKK közös megszervezéséről egyeztetés a MAROVISZ-szal. Konferencia előkészítése.

4. Marketing

- a) A MAE-tagság véleményének felmérése az egyesület működéséről. Célja: a tagság számára hasznos funkciók felmérése és fejlesztése.
- b) A MAE-honlap értékelése, frissítése, üzemeltetése.
- c) A MAE népszerűsítése, vonzóvá tétele a szakmát művelő vállalkozások és egyéni tagok részére.
- d) Anyagvizsgálók Lapjának támogatása, cikkek generálása.
- e) Szakdolgozati témák kiírása laboratóriumok, ipari partnerek segítségével.
- f) Szakdolgozat ill. diplomamunka pályázati feltételek aktualizálása, meghirdetése.
- g) Tagsági adatbázis frissítése (érdeklődési körök, elérhetőség stb.)

5. Az egyesület kapcsolatrendszerének fejlesztése

- a) A tagság bővítési lehetőségeinek elemzése.
- b) Új jogi tagok szervezése.
- c) Új egyéni tagok szervezése.
- d) Az együttműködés további fejlesztése szakmai civil szervezetekkel. Potenciális partnerek felmérése. Az együttműködés formáinak egyeztetése.

6. Közgyűlések és elnökségi ülések ütemezése, megtartása

- a) Elnökségi ülések: az igények szerinti időpontban, a szükséges számú elnökségi ülés. Kihelyezett elnökségi ülések, szakmai programmal kiegészítve.
- b) Évi rendes Közgyűlés a beszámolók elfogadására

***Várunk minden anyagvizsgálattal foglalkozó kollégát,
illetve vállalkozást tagjaink közé!***

titkarsag@mae2012.hu

Jogi tagjaink:

ÁEF Anyagvizsgáló Laboratórium Kft.
AGMI Anyagvizsgáló és Minőségellenőrző Zrt.
Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Anyagtudomány és Technológia Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Polimertechnika Tanszék
Farkas Anyagvizsgáló Bt.
Grimas Ipari Kereskedelmi Kft.
HÁMOR Zrt.
Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség
Miskolci Egyetem - Fémtechnika,
Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet
MTDL - Magyar Tartály Diagnosztikai Laboratórium Kft.
MVM Paksi Atomerőmű Zrt.
NEMAK Győr Alumíniumöntőde Kft.
Orszak NOVUM Bt.
Széchenyi István Egyetem, ATT
Volvid Zrt.