

A Gyártástechnológia Intézeti Tanszék 60 éves története

The 60-year history of the Department of Manufacturing Technology

Dr. Farkas Gabriella*, Dr. Palásti-Kovács Béla*

* Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország

farkas.gabriella@bgk.uni-obuda.hu, palasti.bela@uni-obuda.hu

Összefoglalás — Cikkünkben bemutatjuk a Gyártástechnológiai Intézeti Tanszék 60 évét felölelő történetét. A Gyártástechnológiai Tanszék a felsőoktatási intézményünk egyik olyan szervezeti egysége, amely jelentősen befolyásolja a szakterületen belüli képzést és kutatást. Erőfeszítései nemcsak a tudományos kiválóságot erősítették, hanem a Bánki által nyújtott képzések hírnevének fenntartásában is fontos szerepet játszottak. Az elmúlt évtizedek alatt a Tanszék mind szervezeti mind szakmailag számos átalakulás jellemezte, oktatási tevékenységét mindemelett magas színvonalon teljesítette, kutatási területei a technológiai változásokkal összhangban formálódtak. A Gyártástechnológiai Tanszék 6 évtizedes történetében alapvető és meghatározó szerepet töltött be a felsőoktatási képzésekben és a kutatási tevékenységekben. Oktató-nevelő és tudományos tevékenysége hozzájárult a Bánki 1879-ben alapított jogelődjének, a „Technológia” hírnevének fenntartásához és emeléséhez. Jól példázta ezt a tény is, hogy a Tanszék két főigazgatót, három tudományos főigazgató-helyettest egy oktatási főigazgató-helyettest, egy Dékánt és két dékán-helyettest adott a Bánkinak.

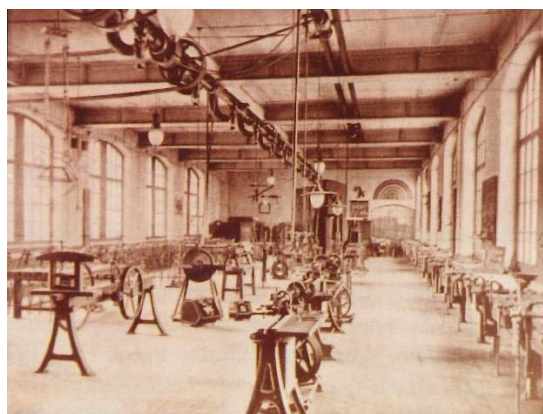
Kulcsszavak: felsőoktatás, Bánki, gyártástechnológia, oktatás-kutatás, laboratóriumok

Abstract — The Department of Manufacturing Technology's 60-year history is presented in this article. One of the departments in our university that has a big influence on instruction and research in the field is the Department of Manufacturing Technology. Its efforts have contributed to upholding the standing of the Bánki training in addition to increasing academic quality. The Department has experienced numerous organizational and professional changes over the past few decades, but its research fields have kept pace with technical advancements and its teaching activities have consistently been of the highest caliber. Over the course of its six-decade existence, the Department of Production Technology has been instrumental in training and doing research in higher education. Its research and teaching endeavors have helped to preserve and improve the standing of the Faculty of Technology, which was established in 1879 and served as the model for the Bánki. The appointment of two Directors General, three Deputy Directors General for Science, one Deputy Director General for Education, one Dean, and two Deputy Deans to Bánki by the Department serves as an example of this.

Keywords: high education, Bánki, manufacturing technology, education-research, laboratories

1 BEVEZETÉS

A Gyártástechnológiai Intézeti Tanszék 2022 óta a Gépészeti és Technológiai Intézetben belül működő oktatási-kutatási tevékenységet ellátó szervezeti egység. Oktatási területét tekintve alapvetően a CAD-CAM-CNC specializációt felölelő tantárgyak oktatását végzi, de a gépészmérnök szakon kívül oktat a mechatronikai mérnök és a biztonságtechnikai mérnök szakokon is. A gyakorlatorientált képzés megvalósítása fontos szempont, ezért a tanszéki laboratóriumok kialakítása és fejlesztése során a vezérlőelv, hogy az ott folyó oktatási-kutatási munkába a mérnökhallgatók minél nagyobb mértékben részt vehessenek. Az egyik legnagyobb, legrégebbi laboratórium a Gépműhely vagy más néven Nagyműhely, amely már a Magyar Királyi állami Felsőipariszkola időszakában is gyakorlati műhelyként funkcionált (1. ábra).



1. ábra: A Magyar Királyi állami Felsőipariszkola gyakorlati műhelye a Népszínház utcai épületben [1]

A magas szakmai színvonalú oktatáshoz elengedhetetlen az ipari partnerekkel kialakított kölcsönösen előnyös kapcsolat. A Tanszék hatévtizedes fennállása során mindig törekedett a vállalatokkal partneri viszonyt kialakítani, ennek keretében számos fejlesztés valósulhatott meg (gyártóberendezés, szerszámozás, mérőeszközök stb.). Emellett közös kutatás-fejlesztési projektek keretében erősödött a szakmai együttműködés, vállalati, kihelyezett oktatások formájában történt továbbképzés, és a szakmai

előadások beintegrálása is megtörtént több tantárgy esetében. A végzett és a tanulmányaikat folytató mérnökhallgatókkal kialakított kapcsolat erősíti a szakmai folytonosságot. A szakmérnöki képzések tekintetében a tanszék kiemelkedő aktivitást mutatott. A Termékfejlesztő szakmérnöki képzés sok éven át működött sikeresen, a Minőségbiztosítási szakmérnök/szakember képzés 1996 óta több száz minőségügyi szakember képzését valósította meg, a Veterángépjármű restaurátor szakmérnök/szakember képzés és szaktanfolyam az elindítása óta töretlenül sikeres, míg a Metrológus szakmérnök/szakember képzés egyedülálló posztgraduális képzés Magyarországon. A Gyártástechnológiai Tanszék fennállása során számos szervezeti formában, kisebb-nagyobb oktatói létszámmal működött, munkatársai elhivatott oktatók és oktatást segítő kollégák, akik az Egyetem és a Kar minőségfejlesztési célokkal összhangban végzik oktatási és kutatási tevékenységüket.

2 A TANSZÉK MEGALKULÁSA ÉS TÖRTÉNETE

A Gépgyártástechnológiai Tanszék a felsőfokú technikai képzés kezdeti éveiben, az 1963/64-es tanévben alapították. 1965 óta jelentős szerepet játszott a gyártástechnológiai szak tematikus tanterveinek kialakításában és a felsőoktatás szakmai normáinak kialakításában. A tanszék személyi és technológiafejlesztési irányultságát a gépipar termelési mérnökök iránti igénye határozta meg.

1969-ben az intézmény történetében sorsfordító átalakulás történt a Felsőfokú Gépipari Technikum főiskolává történő átszervezésével. Az Elnöki Tanács 1969. évi 25. számú rendelete alapján került megalapításra a Bánki Donát Gépipari Műszaki Főiskola. [1,2] A Főiskola olyan műszaki szakemberek képzését oktatását végezte, akiknek feladata:

- a gépipari gyártás műszaki előkészítése,
- a gyártási folyamatok tervezése,
- az egyszerűbb gyártóeszközök tervezése és gyártása,
- a gyártó-szerelő üzemek szervezése és vezetési feladatainak ellátása,
- a termelés programozása és irányítása,
- a termelést kiszolgáló üzemek irányítása és a gépi berendezések üzemeltetése.

A Főiskola indításakor az oktatási és kutatási feladatokat tanszékek látták el, amelyek egyike volt a Gépgyártástechnológiai Tanszék. [3] Tanszék első megbízott vezetője Dr. Sepsey József (1963-1966) volt, majd ezt a feladatkört hosszú éveken keresztül Dr. Angyal Béla főiskolai tanár, főigazgató (1966-1987) látta el.

Az ipari fejlődés az egyetemi végzettségű mérnökök mellett szükségessé tette olyan gyártómérnökök képzését, akik a technológiai folyamatok és a tervezés ismereteivel, valamint gyakorlati tapasztalattal felvértezve képesek a tervezési elképzelések kivételzésére és felügyeletére. A kurzusokat és az szakirányokat úgy alakították ki, hogy igazodjanak az adott kor ipari igényeikhez, aminek eredményeképpen három képzési program jött létre: gépészmérnöki, általános mérnöki és szervezési. A Gépgyártástechnológiai Tanszék oktatási, képzési és kutatási törekvéseibe két ágazat, a forgácsoló és a forgács nélküli alakító került beépítésre.

A Gépgyártástechnológiai Tanszék a Főiskola valamennyi szakán, ágazatán és tagozatán végzett oktatási

tevékenységet, 1985-ig a kihelyezett tagozati képzésben (Kaposvár, Miskolc, Székesfehérvár) is részt vett.

2.1 Gépgyártástechnológiai Intézet (1987-1990)

Az 1987-ben bekövetkezett jelentős szervezeti átalakításnak eredményeképpen az oktatási egységek Intézeti formában történő átszervezése valósult meg. A Gépgyártástechnológiai Intézet a Gépgyártástechnológiai Tanszék és a Mechanikai Technológiai Tanszék személyi állományának, eszközeinek, helyiségeinek és laboratóriumainak összevonásával szerveződött. Az Intézetet, Dr. Angyal Béla főiskolai tanár irányította, az igazgató munkáját az oktatási (Dr. Váradi András főiskolai docens) és a tudományos (Dr. Czinege Imre főiskolai docens) igazgatóhelyettesek segítették. A szervezeti átalakítással egy időben a tantervek korszerűsítésére is sor került. A gyártástechnológia szakon belül új ágazatok, a Gyártóeszköz-szerkesztő, az NC-technológus, a Gyártásszervező, és a Hőkezelő-hegesztő képzési céljai kerültek kidolgozásra. Az ágazati tanterv tantárgyai között számos olyan volt, amely a korábbi tárgyak korszerűsítését igényelte, továbbá a laboratóriumok és az eszközpark korszerűsítésére is nagy hangsúly került, elsősorban a korszerű számítógépes alkalmazások területén (2. ábra).



2. ábra: Bánki Donát Műszaki Főiskola gyakorlati laboratóriumai (Gépműhely, CAD labor, informatika labor, pneumatika labor) [1]

A Főiskolán kialakított intézeti rendszer 1990-ben szűnt meg, és ismét a tanszéki struktúra épült fel. Ez a szervezeti átalakulás új szakok indítását és új tantervek kidolgozását, továbbá a meglévők jelentős korszerűsítését igényelte. Az új képzési irányok megjelenésével a tanszék feladatai is átértékelődtek, összességében azonban minden szakon a képzési célnak megfelelő arányt mutatták, a gyártástechnológia fontosságának megtartása mellett.

2.2 Gépgyártástechnológiai Tanszék (1990-1999)

A Tanszéknek kiemelkedő szerepe volt a műszaki informatikus képzés beindításában, tekintve, hogy a képzés akkreditálása az Intelligens gyártócella szakirányon történt meg. [4] Az 1996-os tantervreformot követően komoly szakmai kihívás elé nézett a Tanszék, mivel a posztgraduális képzések kereteiben kidolgozásra kerültek a Termékfejlesztő és a Minőségügyi szakirányú továbbképzési szak képesítési követelményei, tantervei, és a képzések sikeresen beindultak. Ezen szakok hallgatóinak oktatását - jelentős óraszámban - a Tanszék oktatói látták el. Erre az időszakra esett az AIFSZ, Akkreditált Iskolarendszerű Felsőfokú Szakemberképzés beindítása is. A gépipari mérnökasszisztensek kibocsátásához szintén jelentős műhelyi, laboratóriumi és tantermi óraszámú oktatásra volt szükség.

1997-től a Tanszék a gépészmérnöki szakon az új CAD/CAM szakirány gazdája, másrészt a műszaki informatika szakon indult Tervezőrendszerek szakirány oktatásában is jelentős szerepet vállalt. Ezek mellett jelentős CAD/CAM laboratóriumi igénye volt az integrált mérnöki szakiránynak is. A Gépgyártástechnológiai Tanszék az általa gondozott tantárgyak laboratóriumi háttér igényének magas szintű kielégítésére jelentős erőfeszítéseket tett a korszerű infrastruktúra kiépítésére. A tanszék vezetését ebben az időszakban Dr. Nagy P. Sándor (1990-1993) és Dr. Váradi András (1993-2003) látta el.

Az oktatott tantárgyak témakörei felölelték az ipari termelésben és az üzemi gyakorlatban alkalmazott megmunkálási módokat, a korszerű technológiai eljárásokat, a szerszámok, a készülékek, a gépipari méretellenőrzés módszereit és eszközeit. Foglalkoztak továbbá a gépek, a berendezések, a műszerek működési elveivel, szerkezeti felépítésükkel, valamint a gyártástechnológiai folyamatokban való felhasználásukkal.



3. ábra: Gépműhely

A gyakorlatorientált képzési cél megvalósítása a gyakorlati laboratóriumok kialakítását igényelte. A Gépműhely (3. ábra) folyamatos fejlesztése elengedhetetlen ma is a nagy hallgatói létszámok kiszolgálásához.

2.3 Gépgyártástechnológiai Intézeti Tanszék (2000-től)

2000-ben három önálló műszaki főiskola (Bánki, Kandó, Könnyűipari) egyesülésével megalakult Budapesti Műszaki Főiskola, amely ismét új helyzetet teremtett. A Bánki Donát Gépészmérnöki Főiskolai Karon létrejött az Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet (AGI), melynek egyik intézeti Tanszékeként, majd a 2007. évtől Szakcsoportjaként működött tovább. 2010-től az Óbudai Egyetem a Budapesti Műszaki Főiskola, illetve a jogelődök, a Bánki Donát Műszaki Főiskola, a Kandó Kálmán Műszaki Főiskola és a Könnyűipari Műszaki Főiskola általános és teljes körű jogutódja. [5]

Ennek megfelelően a Tanszék a 2000-es években jelentős fejlődés részese lehetett. Erre az időszakra esett a felsőoktatási képzések teljes átalakítása, az ún. „Bologna-rendszerre” való átállás, az új jellegű szakok akkreditálása, az új BSc-tantervek kidolgozása, a kredit rendszerű oktatás bevezetése, az ide kapcsolódó tanmenetek, tananyagok kidolgozása, az oktatás megszervezése. E munkálatokban a Tanszék oktatói is igen komoly mértékben vettek részt. A számítógépes laboratóriumok korszerűsítése elengedhetetlen volt a modern ipari elvárásoknak megfelelő képzések biztosítása érdekében (4. ábra).



4. ábra: SPC labor a Méréstechnika laboratóriumban

Az Intézet igazgatója Dr. Palásti Kovács Béla (2000-2011), igazgató-helyettese Dr. Czinege Imre (2000-2001), majd Dr. Réger Mihály (2001-20011) lett. Gépgyártástechnológiai Intézeti Tanszék vezetését 2003-ig Dr. Váradi András, 2003-2004, között Dr. Sipos Sándor, majd 2004 és 2017 között Dr. Mikó Balázs látta el. 2007. január 1-től, az egységes szerkezeti felépítéshez igazodóan, az AGI kereteiben, a Szakcsoportok vezetője egyben intézetigazgató-helyettesi jogkörrel is rendelkezett. 2011-től az Intézet igazgatója Dr. Réger Mihály, általános helyettese Dr. Palásti Kovács Béla.

A posztgraduális képzések területén újabb szakmérnöki képzések indultak el. 2010-ben a Veterán gépjármű-restaurátor szakmérnök és szakember képzés, valamint szaktanfolyam. Célja olyan szakemberek oktatása, akik magas szakmai ismereteket szereznek a veterán gépjárművek felújításában, restaurálásában, alkalmasak egyes részfeladatok önálló megoldására, továbbá alkalmasak a kooperációs partnerekkel szembeni elvárások megfogalmazására, ellenőrzésére. Ezenkívül képesek korszerű muzeológiai szemlélettel végezni a gépjárművek restaurálását. [6]

2017-től az Intézet vezetését Dr. Pinke Péter vette át, 2022. novemberétől a Gyártástechnológiai Intézeti Tanszék a Gépészeti és Technológiai Intézetben belüli szervezeti egység lett, a tanszékvezető Dr. Farkas Gabriella.

2018. szeptemberétől az országban elsőként és egyedülálló módon hozta létre és indította el a Gépgyártástechnológiai Intézeti Tanszék a Metrológus szakmérnök/szakember képzést. A képzésben hangsúlyosan jelennek meg a metrológiai alapismeretek, joghatással járó mérések (hitelesítés), akkreditálás és ISO 17025 szabvány, mérési bizonytalanság számítása és a hozzá szorosan kapcsolódó matematikai statisztikai alapok, valamint a mérések minőségüggyel kapcsolatos vetületei.

3 OKTATÁSI-KUTATÁSI TERÜLETEK ÉS LABOROK NAPJAINKBAN

A Tanszék által oktatott tantárgyak valamennyi szakon (Gépészmérnök, Mechatronikai mérnök, Biztonságtechnikai mérnök, Energetikai mérnök) megjelennek, azonban döntő részben a gépészmérnöki BSc képzés CAD/CAM/CNC specializációhoz kapcsolódnak. Más szakokon és szakirányokon a tantárgyak száma kevesebb, azonban az együtt oktatott hallgatói létszám nagyobb. A tantárgyak oktatásában nagy hangsúlyt kapnak a gyakorlati demonstrációk, illetve a megfelelő gyakorlat megszerzése, az eszközök, berendezések használatának elsajátítása. A gyakorlati foglalkozások kialakítása során alapvető szempont volt, hogy a hallgató az adott eszköz, gép, berendezés használatával tegyen szert gyakorlatra és nem szorítkozhatnak csupán a bemutatásra. A

következőkben ismertetésre kerülnek az egyes tanszéki laboratóriumok és az azokban folyó oktatási-kutatási tevékenységek.

A *gyorsprototípus labor* feladata megismertetni a hallgatókkal a 3D tervezésen (CAD) és gyártáson (CAM), valamint a reverse engineeringen keresztül a rapid prototyping eljárásokat. A CAD oktatás 2 féléves, emellett 2 félév a CAM oktatás. A hallgatók jártasságot szereznek az egyszerű testmodellek készítésétől, a felületmodellezésen keresztül a bonyolult összeállításokig és azok mozgásszimulációjáig. A CAM keretében pedig megismerkednek a 2,5D-s és 3D-s marási feladatokkal. A kötelező tantárgyak mellett 3 választható tárgy oktatása is itt történik, melyekkel a hallgatók kiegészíthetik ismereteiket igényük szerint. A labor támogatja a szakdolgozatok, TDK munkák, a projektmunka és hallgatói feladatok elkészítését.

Laborfelszereltség:

- SolidEdge (CAD program)
- EdgeCAM (CAM program)
- Dimension bst 768 3D nyomtató
- ISEL ICP 4030
- Artec Spider 3D scanner

Az *FMS labor* (5. ábra) feladata megismertetni a hallgatókkal a számítógépes gyártástervezés folyamatát. Az FTSZTI. laborgyakorlatain a tervezés mellett, a hallgatók elsajátítják a kézi CNC programozás alapjait 2 és 2.5 D-ig, valamint a szükséges szimulációs szoftverek használatát. A kötelező tantárgyak mellett a CNC technológiával kapcsolatos további ismereteket is szerezhet a hallgató. A CNC műhelygyakorlat során a vezérlésszimulátorok segítségével megtanulják kezelni a MiniMill HAAS CNC marógépet és a CNC programok paraméteres programozási lehetőségeit. A CNC programozás és szimulátorok kurzusain a CNC technológiához tartozó szimulációs lehetőségeket mutatjuk be és a CNC programozást támogató vizuális rendszerekkel ismerkednek meg a hallgatók. CNC Szakkört is tartunk a laborban, amit a Bánki Szakkollégium szervez. A labor támogatja a szakdolgozatok, TDK munkák, a projektmunka és hallgatói feladatok elkészítését.

Laborfelszereltség:

- 4 darab HAAS vezérlő szimulátor
- 12 számítógépes munkaállomás
- SolidEdge (CAD program)
- EdgeCAM (CAM program)
- MTS szimulációs szoftver (CNC/CAM)
- NCT20x/30x szimulációs szoftver (CNC)



5. ábra: CNC programozás és szimulátorok az FMS laboratóriumban

A *koordináta mérés technika* (6. ábra) labor elsősorban kutatási projektek támogatását szolgálja, gyakorlati oktatás

kevésebbé jelenik meg. Kialakítása és berendezési lehetőségei teszik a különböző felület paraméterek méréséhez kapcsolódóan tudományos vizsgálatokat. A mérőberendezések a megmunkált felületek geometriai méréseit biztosítják. A mérőszoba támogatja a doktori disszertációk, a szakdolgozatok, a TDK munkák, a projektmunka és hallgatói feladatok elkészítését.

Laborfelszereltség:

- Mitutoyo PJ-A3000 (mérőprojektor)
- Mitutoyo Crysta Plus (koordinátamérőgép)
- Mitutoyo SJ-301 (felületi érdességmérő)
- Mahr Perthometer PRK (felületi érdességmérő)
- Mahr MarSurf GD 120 (felületi érdességmérő)
- Nikon SMZ18 (stereomikroszkóp)



6. ábra: Koordináta mérés technika laboratórium

A *hosszmérés technika labor* célja megismertetni a hallgatókkal a legáltalánosabban használt kézi hossz- és szög mérő eszközöket, a konvencionális (nem lézeres) optikai eszközöket, elsajátítani rutinszerű használatukat. E mellett a koordináta mérés technika két legáltalánosabb eszköze, egy kisméretű telepített mérőgép és egy mérőkar szolgálja a gyakorlati oktatást. A kettéosztott nagylabor egyik fele 6 munkaállomással szolgálja az SPC folyamat megismerésének gyakorlati szoftveres támogatását és a minőségügy témakörű oktatásokat. Ezen munkaállomásokon folynak a Zeiss Calypso program által támogatott mérés-szimulációs gyakorlatok több tárgy részére. A labor támogatja a szakdolgozatok, TDK munkák, a projektmunka és hallgatói feladatok elkészítését.

Laborfelszereltség:

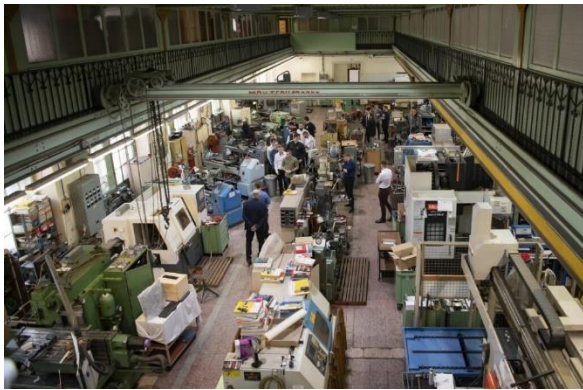
- Mitutoyo BX 300 manuális, kapcsoló típusú mérőfejes koordináta mérőgép Cosmos 2.4 mérőprogrammal
- Mitutoyo PJ-H3000F konvencionális mérőprojektor Cosmos 2.4 programmal
- Zeiss spirálmikroszkópos optikai mérőléc hossz mérőpad
- Romer Multigage kisméretű hordozható mérőkar Hexagon alap-mérőprogrammal
- Zeiss Calypso 2014 Mérőprogram-építő és szimulációs program (kimenet nélküli Student licenccel)
- Helios 750 monokrom fényforrásos tengelyvizsgáló berendezés, Helios mérőprogram Windows 2000 alapon, soros adatkimenettel
- különféle tolómércék, mikrométerek, mérőórák analóg és digitális kivitelben, mérőhasábok, idomszerek, szögmérők, optikátor, fénymikroszkóp

A *Prototípus fejlesztő labor* célja egyedi alkatrészek, szerszámok, készülékek, berendezések, modellek gyártása, illetve újra gyártása, ezen tevékenységek során alkalmazható technológiák bemutatása, alkalmazástechnikai kutatása. A laborban lehetőség van forgácsoló megmunkálások végzésére, szilikon öntőformák készítésére, kompozit alkatrészek előállítására.

A labor fontos szerepet játszik a Projekt munka c. tantárgy során megoldandó feladatok megoldásában, a Veterán gépjármű restaurátor képzésben, valamint szakdolgozatok megoldása során.

Laborfelszereltség:

- műszerész eszterga / marógép
- asztali fűrőgép
- kéziszerszámok



7. ábra: Gépműhely

A *gépműhely alapfeladata* a forgácsoló eljárások jelenségeinek laboratóriumi mérése, a szerszámgépek bemutatása, az CNC- programozás gyakorlati oktatása és a gépműhelygyakorlatok megvalósítása. A hallgatók két féléves gépműhelygyakorlaton szereznek jártasságot a gépek kezelésében, megismerik, elsajátítják a forgácsoló eljárásokat. A gyakorlatorientált képzés igényeinek kielégítése itt jelenik meg leglátványosabban, egyrészt a nagy hallgatói létszámok (gépész és mechatronika BSc), másrészt a projektmunka és a hallgatói feladatok elkészítése miatt. A gépműhelyben ugyanakkor jelentős kutatási munka is folyik: a szerszámok teljesítőképességi és munkadarabok forgácsolhatósági vizsgálatának kísérleti megvalósításával.

Laborfelszereltség:

- CNC-esztergák: Dugard Eagle BNC-1840 (2008), Colchester Tornado A50 NC (2006), EuroTurn 12B (2005), MAZAK SQT 10 MS (1996)
- CNC-marógépek: Mazak A410-II (2008), MSN 500, FEHLMANN Picomax 100 (1980, vezérlés cseréje: 2007)
- Elbo Controlli Hathor szerszámberő készülék (2009),
- Hagyományos (30-40 éves) szerszámgépek: 7 db egytetemes eszterga, 3 db marógép, palástköszörű, síkköszörű, gyalugép, tömbszikraforgácsoló gép, vésőgép, lefejtő marógép, sugárfűrőgép, oszlopos fűrőgépek, keretes szalagfűrész,
- Kistler forgó erőmérő berendezés, Kistler erőmérőpad kiértékelő szoftverrel
- Sztereomikroszkóp kamerával, kiértékelő szoftverrel

- Minimálkenéses készülék, hidegsugor szerszámbebefogó berendezés

A *Lean technológia labor* alapfeladata a Lean filozófián alapuló elvek, módszerek, megközelítések és minőségtechnikák gyakorlati oktatása. Ez egy gyártási, összeszerelési folyamat szimulációjának bemutatásán keresztül valósul meg. A labor céljai közé tartozik a minőségbiztosítás témaköreinek gyakorlatorientált bemutatása, alkalmazása; a Lean-nel kapcsolatos témakörök oktatása gyakorlati prezentációval; a gyakorlati foglalkozásokon a csapatmunka erősítése; a hallgatók problémamegoldó képességeinek fejlesztése; az Ipar 4.0 egyes elemeinek oktatása. Jellemzően tekintve oktatási és kutatási feladatokat egyaránt ellát.

Laborfelszereltség:

- 5 munkaállomás, logisztikai eszközök, raktár állvány
- 2 féle, elemekből összeépíthető kisautó (összesen 80 db.)

A Tanszék gondozásában található laboratóriumok fejlesztése során főbb szempontok között szerepelt tehát a mérnökképzéssel szembeni ipari elvárásoknak való megfelelés, a hallgatók gyakorlatorientált oktatásának megvalósítása és a hallgatók kutatási projektekre történő aktív bevonása.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] A Bánki Donát Műszaki Főiskola jubileumi évkönyve 1879-1999. Budapest, 1999. Szerkesztette: Dr. Gáti József
- [2] A Bánki Donát Gépipari Műszaki Főiskola centenáriumi emlékkönyve 1879-1979. Budapest, 1979. Szerkesztette: Dr. Király József
- [3] A Bánki Donát Gépipari Műszaki Főiskola jubileumi évkönyve 1879-1989. Budapest, 1989. Szerkesztették: Hetényi István, Dr. Nagy P. Sándor
- [4] Dr. Agyal Béla – Dr. Nagy P. Sándor – Dr. Váradi András: A Gépgyártástechnológiai Tanszék bemutatása. Gépgyártástechnológia XXXV. évf.. 1995/11-12 p.347-351.
- [5] A Budapesti Műszaki Főiskola jubileumi évkönyve 1879-2004. Budapest, 2004. Szerkesztette: Dr. Gáti József
- [6] Dr. Palásti Kovács Béla: A Gépgyártástechnológiai Tanszék/Szakcsoport (1963-2013) Kézirat 2013.

Az érdesség-előállító képesség vizsgálata esztergálásnál

Examination of surface roughness producing ability in case of turning

Sipos Sándor, Mészáros Béla, Ráczki Viktor, Mikó Balázs

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország
sipos.sandor@bgtk.uni-obuda.hu

Összefoglalás - A nagyon sokféle feladat elvégzésére alkalmazható forgácsoló szerszámoknál az igazi nehézséget a szóba jöhető választék nagy száma okozza, mert egy adott műveletnél össze kell hangolni a technológiai körülményeket a gazdasági rentabilitással és a minőségi követelményekkel. Az esztergáló szerszámok területén megjelenő innovációk – az új elveknek megfelelő konstrukciós megoldásaikkal – még tovább bonyolítják a helyzetet. A cikk célkitűzése a különböző kivitelű és rendeltetésű esztergaszerszámok érdesség-előállító képességének összehasonlítása, elemzése és sajátosságainak vizsgálata. Jelen anyag a forgácsleválasztás elméleti egyenleteit és a mérésrel meghatározott értékek közötti összefüggéseket hasonlítja össze, és modelleket ismertet a különböző körülményekkel esztergált felületek érdességi jellemzőinek leírására.

Kulcsszavak: érdességi paraméterek, szerszámválasztás, forgácsleválasztási módok, elméleti érdesség, simasági jellemzők összefüggései

Summary - For (universal) cutting tools, being usable to perform a wide variety of tasks, the real difficulty is the enormous number of possible choices, because the technological conditions for a given operation must be harmonised with economic profitability and quality requirements. Innovations, emerging in the field of turning tools, introduce design solutions, corresponding to the new principles, further complicate the situation. The aim of the present article is to compare and analyse the roughness producing ability of turning tools, having different designs and functions, and to examine their features. The present paper attempts to verify the relationships between the theoretical equations of chip removal and the values, determined by measurement, and presents models to describe the roughness characteristics of surfaces, turned under different conditions.

Keywords: roughness parameters, tool selection, chip separation methods, theoretical roughness, smoothness characteristics

BEVEZETÉS

A különböző célú esztergálási műveletek tervezése során az okoz igazán nehézséget, mely szerszám alkalmazása a legcélszerűbb a számos szóba jöhető változat közül. A technológiai előírásokat és az egyre szigorodó minőségi követelményeket össze kell hangolni a nagy termelékenységgel és a költséghatékonysággal. A kérdés így vetődik fel: a már meglévő készletekből történő választás (ragasztás a régi gyakorlathoz) vagy pedig az ezen a területen megjelenő számos innováció hozhat nagyobb hasznot.

A cikk a minőségi előírások teljesítéséhez ad segítséget azzal, hogy a különböző kialakítású szerszámok viselkedését jellemzi az érdesség-előállítási képességük alapján. *Fő célkitűzésünk* a különféle alakú lapkák hatékonyságának összehasonlítása volt. Arra kerestük a választ, mennyire lehet megközelíteni a régi és az új elméleti egyenletekre támaszkodva a többszöri mérésrel meghatározott adatokat. Másik célunk annak eldöntése volt, hogy az érdesség különböző paraméterei között felfedezhető-e kapcsolat, az érdességi profilnak vannak-e olyan jellemzői, amelyek egy univerzális paramétert jelentenek. A korszerű mérőeszközökkel elvégzett szisztematikus tesztorozat eredményeit ezért nem csak az iparban megszokott adatokkal (Ra, Rz) jellemezzük, hanem azokra a paraméterekre is kitérünk, amelyek a különböző beállítással megmunkált felületeket a felhasználás során jellemezzhetik.

Jelen kutatás végső célja az ISO geometriájú lapkák leghatékonyabb alkalmazási körülményeinek és a leginkább megfelelő adatok meghatározása volt.

1. A FORGÁCSLEVÁLASZTÁS SAJÁTÓSÁGAI ESZTERGÁLÁSKOR

A szabályos élgeometriájú szerszámok forgácsleválasztása teljes mértékben összefügg az éppen megmunkált felület alakpontosságával és felületminőségével. A szerszám forgácsoló részének kialakítása (élszögek, csúcscsugár, élpreparáció) és a forgácsolási adatok közül elsősorban az előtolás és a fogásmélység az, amely döntő mértékben meghatározza a felület mikrogeometriáját.

Az esztergáláskor kialakuló elméleti érdesség meghatározása az 1930-as években elkezdődött, az előtolás és a csúcscsugár (RE, mm) közötti összefüggéseket Bauer (1937) publikálta. Tovább pontosította 1961-ban a képleteket Brammertz, aki már a minimálisan leválasztható forgácsvastagsággal (h_{min} , mm) is foglalkozott [1]. Ezek az összefüggések az előtolás és a csúcscsugár szerepét emelik ki. A forgácsleválasztásban azonban meghatározó szerepet játszanak az ún. nézeti szögek is, tehát a főélszög (KAPR), csúcscsög (EPSR) és a mellékélszög (ECEA). Esztergáláskor – a csúcscsugárral együtt – ezek határozzák meg a leválasztott forgács (metszet) alakját és a szerszám kinematikai nyomát jelentő érdességet, amely a beállított előtolás (f, mm) mértékével függ össze. A hatvanas évektől kezdődően több kutató is képleteket közölt az elméleti érdesség és a nézeti szögekkel kapcsolatban, elég csak Kardos, Szokolovszkij, Makarov, Brewer, Gribovski

munkáit említeni [2, 3, 4, 5, 6]. A számítógépek tömeges megjelenésével egyidejűleg a forgácsleválasztásról egyre pontosabb modellek jelentek meg [7], az egyre korszerűbb, tapintó elven működő érdességmérők pedig lehetővé tették a kísérletekből származó adatok összevetését az elméleti érdességi képletek eredményeivel. Az ipar igényei szerinti érdesség-vizsgálatok területén akkor emelkedett a kísérletező kedv és a publikációk száma, amikor a statisztikai kísérlettervezés (DoE) különféle módszerei elterjedtek, például a teljes faktoranalízis, válaszfelületek módszere stb., a forgácsolási tényezők (faktorok) és az érdesség egyes jellemzőinek (paraméter) modellezésére [8, 9].

Az egyre precízebb gyártmányok és előállítási eljárásaik természetesen egyre pontosabb előírásokat (szabványokat) és vizsgálati módszereket követelnek meg. A megmunkált felületek jellemzésére az érdességi jellemzők bővülő köre szolgál, amelyek pontosabban képesek leírni az előállított felületi textúrát. A tapintóval végrehajtott 2D-s elemzéseket fokozatosan felváltják a 3D-s vizsgálatok, amelyeknél már nincs is szükség a felület megérintésére [10, 11, 12].

Jelen anyag a forgácsleválasztás és a felületi érdesség alakulásának szempontjából foglalja össze a különféle kialakítású, azaz a kitzűzött célnak megfelelően választott lapkákkal és a befogásukra szolgáló tartókkal elvégzett szisztematikus tesztsorozat eredményeit. A szerzők alapvető célkitűzése az elméleti egyenletek és az érdességméréssel meghatározott értékek közötti kapcsolat megkeresése volt. A kapott adatok alapján különféle modelleket dolgoztunk ki, emellett a paraméterek olyan összefüggésrendszerét tártuk fel, amely alkalmas az érdességi jellemzők közötti kapcsolat számítógépes programjának kifejlesztésére is.

1.1 A forgácsleválasztás módjai esztergáláskor

Esztergáláskor – előre beállított fogásmélységgel (a , mm) és előtolással (f , mm) dolgozva – a munkadarabbal elvileg a szerszám főéle, csúcscugara és mellékéle érintkezik. A forgácsolás körülményeit a technológia adatok és a szerszámkialakítás határozzák meg, ahol a forgácsot közvetlenül leválasztó szerszámrészek az aktív élhossz (l_{akt}) alkotják. A leválasztásban résztvevő élszakaszok alapján meg lehet különböztetni

1. *rádiuszon* történő finomesztergálást, amikor a fogásmélység (a) kisebb, mint az RE csúcscugár ($a < RE$),
2. ritka esetben *fordított forgácsolást*, amikor a rádiuszon történő forgácsoláskor az előtolás (f) nagyobb, mint a fogásvétel ($a < RE$ ÉS $a < f$). Ilyen fordul elő az újabban elterjedt ún. high feed turning esetében,
3. nagyon gyakori eset az *(él)csúcson* végzett esztergálás, amikor csak a főél és a csúcscugár vesz részt a forgácsképzésben, azaz a $a > RE$, de a mellékél passzív szereplő,
4. hasonlóképpen igen gyakori az az eset, hogy *mindhárom élszakasz* (azaz a mellékél is) részt vesz a forgácsolásban.

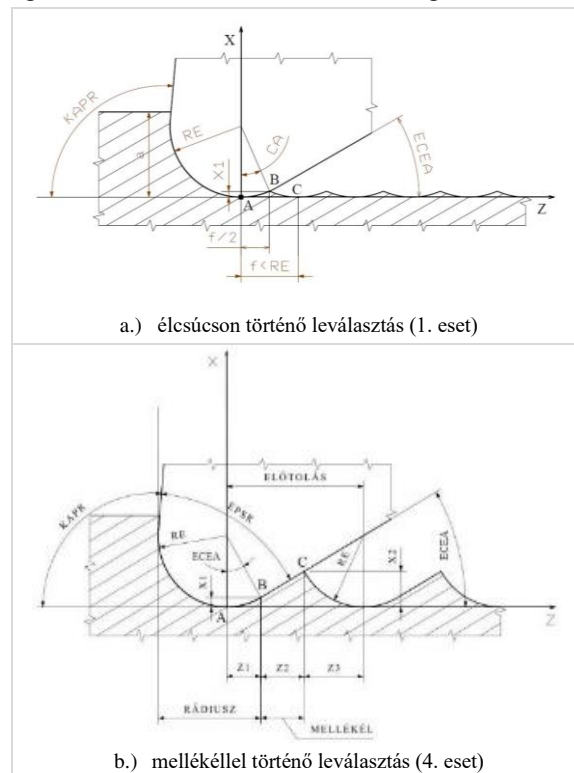
Az aktív élhossz tanulmányozása elsősorban azért fontos, mert a méret létrehozásában döntő szerepe van: a munkadarabbal érintkező csúcscugár egyetlen pontja az ún. forgácsolópont, és ennek kis környezetében alakul ki a

megmunkált felület mikrogeometriája, azaz a hullámossága és az érdessége.

A részekre tagolható aktív élhossz között vannak olyan szakaszok, amelyek kizárólag a szerszám kialakításától, azaz élszögeitől és csúcscugarától függenek. Ezen részek az esztergált felületre rámásolódnak, mégpedig olyan diszkrét távolságokban, amilyen mértékű az alkalmazott előtolás. Amennyiben tehát az érdesség és az előtolás összefüggésének vizsgálata a célkitűzés, az aktív élhossz meghatározása nélkülözhetetlen.

Az 1. ábra a két legfontosabb leválasztási módszer sajátosságait mutatja be két, jellemző változat esetén. Az egyik kialakítás tartókdja xDJxx (főélszög: 93°), az illeszkedő lapka jele „D” (csúcscsőg: 55°), míg a másik szerszám tartója xCLxx (főélszög: 95°), a lapka pedig „C” (csúcscsőg: 80°) jelölésű. Megjegyezzük, hogy csak azokat a kódokat adtuk meg, amelyek a vizsgálatunk szempontjából fontosak, a többit „x” helyettesíti.

Az *élcscúcson történő forgácsolás* elterjedten alkalmazott bonyolult geometriák, illetve henger-, kúp- és/vagy tóruszfelületek simító (ún. kontúrkövető) esztergálásakor (1/a. ábra). A befogott lapka csúcscsőge (EPSR) általában nem nagyobb 60° -nál (az ISO 1832 szerinti besorolás szerint „T”, „D”, esetleg „V” alakú), a forgácsleválasztásban a főél és a csúcscugar vesz részt.



1. ábra: A működő élszakaszok esztergáláskor

A forgácsot közvetlenül leválasztó szerszámrészek az aktív élhossz alkotják, amelynek képlete – az ISO13399 szabvány jelöléseit alkalmazva – a következő:

$$l_{akt} = \frac{a - RE \cdot (1 - \cos KAPR)}{\sin KAPR} + \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot KAPR + \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot \sin^{-1} \frac{f}{2 \cdot RE} \quad [mm] \quad (1).$$

Az (1) egyenletből látható: egy beállított fogásmélységgel (a , mm) dolgozó lapka élhossza csúcson történő esztergáláskor két részből tevődik össze. A

szerszám kialakításától (KAPR, RE) függő tagok konstans értéket adnak, meghatározása:

$$l_{const} = \frac{a - RE \cdot (1 - \cos KAPR)}{\sin KAPR} + \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot KAPR \quad [mm] \quad (1a),$$

míg az AB élszakasz metszi (másképpen behatárolja) az egy fordulattal előző rádiusz BC szakaszát. Az előtolástól függő rész (amelyet az 1/a. ábrán a CA szög reprezentál) a következő:

$$l_f = \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot \sin^{-1} \frac{f}{2 \cdot RE} \quad [mm] \quad (1b).$$

A három élszakasszal történő esztergáláskor már a mellékél is aktívan részt vesz a forgácsképzésben, ezért a darabbal érintkező élhossz képlete az alábbira módosul:

$$l_{akt} = \frac{a - RE \cdot (1 - \cos KAPR)}{\sin KAPR} + \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot (KAPR + ECEA) + \frac{RE}{\sin ECEA} \cdot \left\{ \cos ECEA - \sin \left[ECEA - \sin^{-1} \left(\frac{f \cdot \sin ECEA}{RE} - 1 \right) \right] \right\} \quad [mm] \quad (2)$$

A (2) összefüggés elemzéséből az derül ki, hogy a szerszám kialakításától (KAPR, ECEA, RE) függő tagok konstans értéket adnak:

$$l_{const} = \frac{a - RE \cdot (1 - \cos KAPR)}{\sin KAPR} + \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot (KAPR + ECEA) \quad [mm] \quad (2a)$$

míg az éppen dolgozó élszakaszok előtolástól függő része a következő:

$$l_f = \frac{RE}{\sin ECEA} \cdot \left\{ \cos ECEA - \sin \left[ECEA - \sin^{-1} \left(\frac{f \cdot \sin ECEA}{RE} - 1 \right) \right] \right\} \quad [mm] \quad (2b)$$

A 2. ábra a forgácskeresztmetszetet meghatározó (fogásvételi és előtolási) adatok függvényében szemlélteti a működő élhossz alakulását a vizsgált kétféle szerszámkialakításnál. Megjegyezzük, hogy vizsgált változatoknál a KAPR főélszög gyakorlatilag megegyező (93°, illetve 95°).

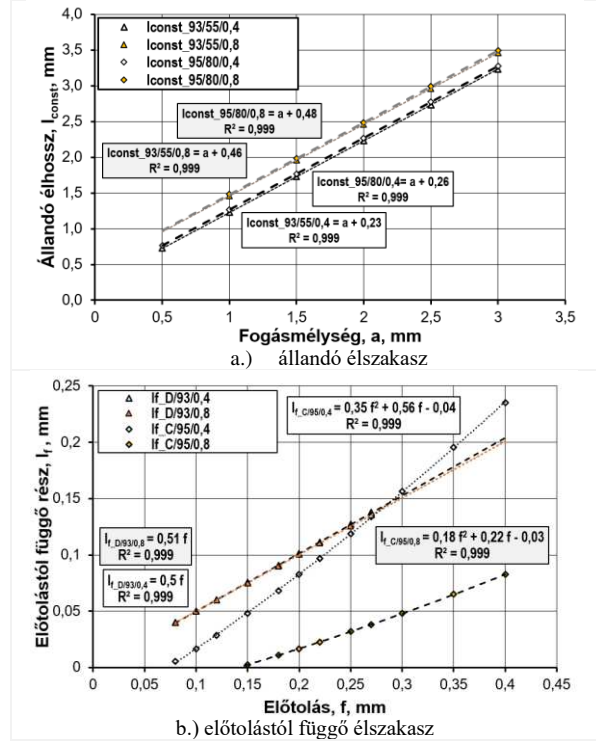
A 2/a. ábra a fogásmélység függvényében tünteti fel az állandó élszakaszokat. A közölt diagramból megállapítható, hogy

- az élhossz nagyságát a döntő mértékben a fogásmélység határozza meg, míg a csúcsgugár szerepe elhanyagolható,
- a C alakú lapkánál a nagyobb csúcsgugár esetén már kimutatható a mellékél szögének (ECEA=5°) élhosszra növelő hatása,
- a diagram nem tartalmazza a rádiuson történő forgácsolás esetét, amelyet az a=0,5 mm és RE=0,8 mm, azaz RE > a körülmények jellemeznek.

A beállított előtolás függvényében négy esetet tüntet fel a 2/b. ábra. A diagramokat elemezve megállapítható, hogy

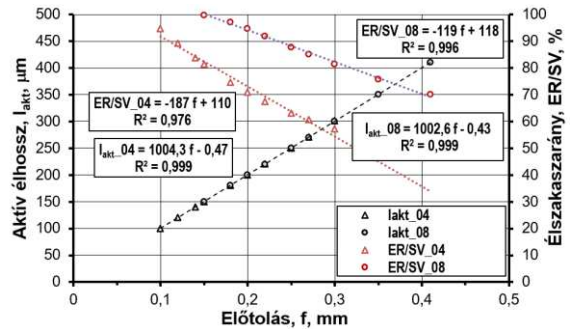
- mindkét kialakításnál az élhossz előtolástól függő része egy nagyságrenddel *kisebb*, mint a kialakítástól függő l_{const} élszakasz,
- az előtolástól függő élszakasz méretét csak a mellékélszög (ECEA) és az alkalmazott csúcsgugár (RE) értéke befolyásolja. Az előbbi függ a tartó KAPR élszögétől, a lapka alakjától és annak csúcshögtől (EPSR),

- nagy mellékélszög esetén (D alakú lapka, ECEA=32°) a beállított előtolás felének megfelelő élszakasz vesz részt a forgácsleválasztásban, míg kis mellékélszög esetén (C alakú lapka, ECEA=5°) ez a hányad kisebb,
- a diagram nem tartalmazza az RE=0,8 mm csúcsgugár esetén a kritikus előtolásnál kisebb értékeket ($f_{krit} \geq 0,14$ mm), ilyen körülmények között ugyanis nem érvényes a „három élszakaszos” leválasztás (azaz csúcson történő esztergálásnál fordul elő).



2. ábra: Különböző szerszámkialakítások élszakaszi

Az üzemi gyakorlatban alkalmazott esztergálási adatok alapján az állapítható meg, hogy az aktív élhossz döntő részét a konstans szakasz adja, míg az előtolástól függő rész *mindössze 5...8%-ot tesz ki* az állandóan dolgozó részhez viszonyítva.



3. ábra: Forgácsleválasztás aktív mellékél esetén

A 2. ábra alkalmas különböző fogásmélység és előtolás adatok beállítása esetén a vizsgált két szerszámváltozat élszakaszainak számítására, terjedelmi korlátok miatt azonban a képletek közlésétől eltekintünk.

A mellékéllal történő forgácsleválasztás sajátosságait elemezve még egy fontos részlet lehet megemlíteni. A 3. ábra a „C” alakjelű lapka EPSR=80°/ECEA=5° csúcscsával történő esztergálás élhosszviszonyait mutatja be. A diagramból, de főleg a regressziós egyenletekből az derül

ki, hogy az aktív élhosszak gyakorlatilag nem mutatnak különbséget a vizsgált kétféle csúcsgugár alkalmazása esetén sem.

Az is megállapítható, hogy a lapka rádiusza (RE) és mellékéle (SV) másként veszi ki a részét a forgácsképzésből: az előtolás növelésekor RE=0,4 mm esetén 95%-ról 60%-ra, RE=0,8 mm-nél pedig 100%-ról 70%-ra csökken a rádiusz által leválasztott forgács mennyisége. Ez természetesen azt is jelenti, hogy kis csúcsgugár alkalmazásakor a mellékél szerepe jelentős, de a nagyobb rádiusznál is érződik a hatása.

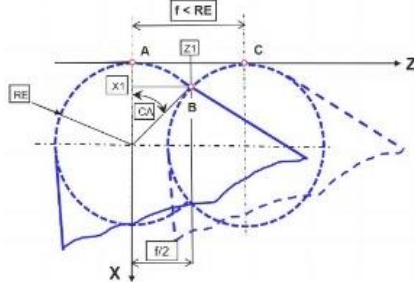
1.2 Az érdességképzés sajátosságai esztergáláskor

Az aktív élhossz tanulmányozása elsősorban azért fontos, mert a méret létrehozásában döntő szerepe van: a munkadarabbal érintkező csúcsgugár „egyetlen pontja” az ún. forgácsolópont, amelynek kis környezetében alakul ki a megmunkált felület mikrogeometriája, azaz a hullámossága és az érdessége.

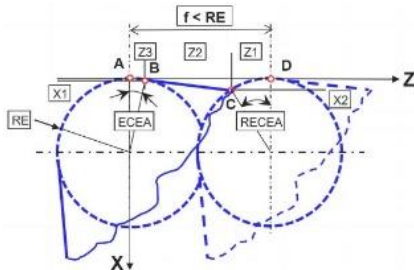
A szerszám aktív élszakaszainak meghatározása tehát korántsem jelenti azoknak az élrészeknek a számításba vételét, amelyek a szerszám élével létrehozott elméleti érdességet okozzák! Ez ugyanis az eszköznek az a több darabból álló vonala, amely közvetlenül a forgácsolópont közelében van, ezért annak geometriai elemei a munkadarabra átmásolódva felismerhetők a megmunkált felületen.

A forgácsleválasztás előzőekben felsorolt négyféle formája az esztergálás gyakorlatában összesen csak két alapesetre vezethető vissza, amelyet az 1. ábra kapcsán vettünk részletesen vizsgálat alá.

A 4. ábra a forgácsolólél érdességképző szakaszait mutatja be olyan esetekben, ahol az előtolás a csúcsgugárnál kisebb. A megadott geometriai feltételek mellett az érdesség (X tengely) nagyon kicsiny, ezért a vázlatok kissé torzítottak.



a.) csúccsal történő leválasztás



b.) három élszakasz dolgozik

4. ábra: Leválasztási módszerek az elméleti érdesség számításához

1.2.1 Szerszámcsúcson történő esztergálás

A csúcson történő forgácsoláskor a szerszám érdesség-előállító (rádiusos) élszakaszának (l_{erd}) hosszúsága a 4/a. ábra szerint

$$l_{erd} = 2 \cdot \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot CA \quad [mm] \quad (3).$$

Ezt jelenti, hogy minden esetben a rádiuszos élszakasz hogy meghatározó nyomot a megmunkált felületen. Megjegyezzük, hogy a (3) összefüggésben szereplő ún. érdességképző élszakasz nyilvánvalóan kétszerese az (1/b) egyenletben szereplő értéknek.

Általános szabályként fogalmazható meg a következő: minden olyan esztergálási műveletnél a szerszám csúcscsával történik az érdességképzés, ahol az előtolásra nézve az alábbi reláció teljesül:

$$f_{be} < f_{krit} = 2 \times RE \cdot \sin(ECEA) \quad [mm] \quad (4).$$

A (4) egyenletben előírt feltétel a gyakorlatban alkalmazott szerszámok igen nagy hányadánál teljesül. Különösen azoknál, ahol a lapkák alakjele vagy „T”, „D” vagy „V” betűvel kezdődik (ezek az ún. másolólapkák), vagy pedig a felsorolt alakok szerszámartói nem teszik lehetővé a kis mellékélszögek használatát. Az „S” alakú lapkák – geometriai kötöttségük folytán – részben ebbe a csoportba sorolhatóak, ha a tartó KAPR szöge kisebb 75° -nál.

Az elméleti érdesség ilyen esetekben a következőképpen határozható meg:

$$X1 = 1000 \cdot RE \cdot (1 - \cos(CA)) \quad [\mu m] \quad (5a),$$

ahol az érintkezési szög (CA) a következő (4/a. ábra):

$$CA = \sin^{-1} \left(\frac{f}{2 \cdot RE} \right) \quad [^\circ] \quad (5b),$$

azaz

$$X1 = R_{zel} = 1000 \cdot RE \cdot \left(1 - \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{f}{2 \cdot RE} \right) \right) \right) \quad [\mu m] \quad (5).$$

1.2.2 Több élszakasszal történő esztergálás

A több élszakasszal történő leválasztáskor 4/b. ábra szerint döntően a csúcsgugár, valamint a mellékél egy kis szakasza vesz részt az érdességképzésben. Ilyen esetben két feltételnek kell egyidőben teljesülnie, mégpedig

$$f_{be} > f_{krit} = 2 \times RE \cdot \sin(ECEA) \quad [mm] \quad (6a),$$

illetve

$$ECEA \leq CA = \sin^{-1} \left(\frac{f}{2 \cdot RE} \right) \quad [^\circ] \quad (6b).$$

A (6b) egyenletben előírt (második) feltétel a gyakorlatban alkalmazott szerszámok kisebb hányadánál teljesül, nevezetesen azoknál, amelyekbe „C”, „E” vagy „W” alakú lapkák valók. Ezen lapkák csúcscsöge EPSR $75 \dots 80^\circ$, míg a többcélú felhasználtóság miatt a szerszámartók főélszöge $KAPR > 90^\circ$.

Az elméleti érdesség ebben az esetben a rádiusz és a mellékél „C” metszéspontjában alakul ki (4/b. ábra), meghatározása pedig a következő:

$$X1 = 1000 \cdot RE \cdot (1 - \cos(ECEA)) \quad [\mu m] \quad (7a),$$

$$X2 = 1000 \cdot RE \cdot (1 - \cos(RECEA)) \quad [\mu m] \quad (7b),$$

ahol a metszési szög (RECEA) a következő:

$$RECEA = \frac{\widehat{CD}}{RE} \cdot \frac{180}{\pi} \quad [^\circ] \quad (7c),$$

ezzel pedig

$$X2 = R_{zelm} = 1000 \cdot RE \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{\widehat{CD}}{RE} \cdot \frac{180}{\pi} \right) \right) \quad [\mu m] \quad (7)$$

A \widehat{CD} ívhossz és az elméleti érdesség (X_2) értékének meghatározása a [13] irodalomban található. Megjegyezzük, hogy az elméleti érdesség számítására több szakirodalomban (pl. [2], [4], [3], [14]) is hibás összefüggések találhatók.

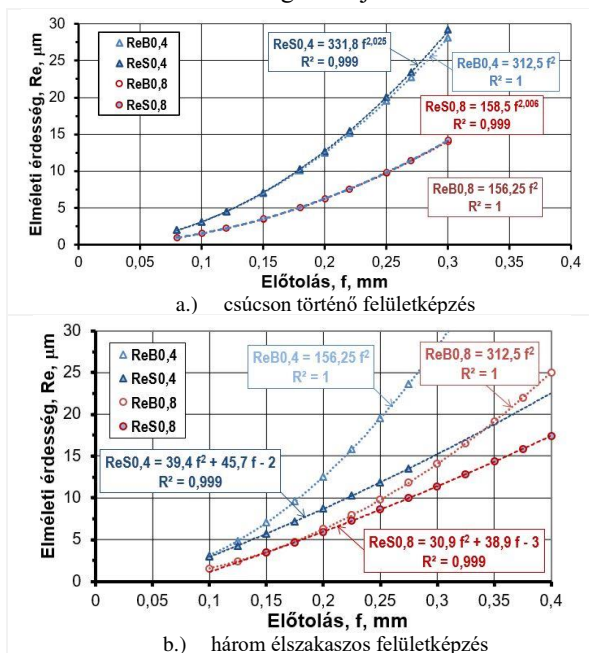
A három élszakaszos forgácsoláskor a szerszám összetett élvonalal vesz részt az érdesség kialakításában: a rádiusz két részletben, a mellékél pedig egy szakaszon dolgozik. Az ún. érdességképző rész (l_{erd}) összegzett hosszúsága a következő [13]:

$$l_{erd} = \frac{RE \cdot \pi}{180} \cdot (ECEA + RECEA) + \sqrt{Z^2 + (X_2 - X_1)^2} \text{ [mm]} \quad (8).$$

Megjegyezzük, hogy a (2/b) összefüggésben szereplő előtolástól függő élszakasz és a (8) összefüggéssel kiszámolt érték között mindössze néhány tized mikrométer az eltérés.

1.3 Az elméleti érdesség és az előtolás összefüggése

Az előzőekben bemutatott kétféle leválasztási módszer teljesen különböző, a kétféle kialakítású szerszám által készített felület elméleti érdességét pedig teljesen eltérő képletekkel lehet meghatározni és modellezni. Az 5. ábra az előtolás függvényében mutatja be a Bauer-féle képlet szerint számított adatokat (ReB04 és ReB08), míg az általunk levezetett korrigált egyenletekkel számított adatokat az ReS04 és ReS08 görbék jelölik.



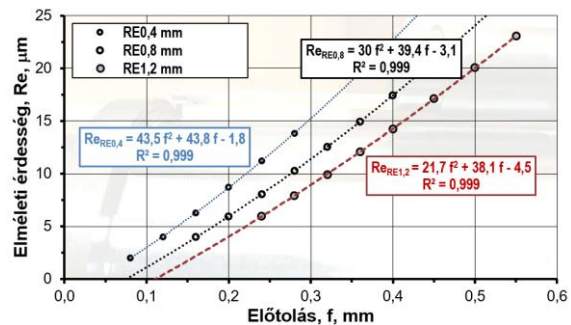
5. ábra: Az elméleti érdesség alakulása a kétféle leválasztási módszerrel

A grafikonok elemzéséből az derül ki, hogy

- a csúcson történő esztergáláskor (5/a. ábra) az elméleti érdesség hatványfüggvény jellegű. Ahogy az ábrán is látható, a Bauer összefüggés másodfokú parabola (totális szorosság mellett), az általunk levezetett (5a) képlet konstansa azonban nagyobb, mint a Bauer-féle $\frac{125}{RE}$ arány számolt értéke, kitevője pedig – a csúcsgugár nagyságától függően – nagyobb, mint 2,0. A szorosság értéke azért nem $R^2 = 1$, mert a konstansok és a kitevők egyaránt kerekített értékek;

- az 5/b. ábrán jól látszik, hogy a három élszakaszos felületképzéskor (tehát amikor a mellékél részt vesz a forgács leválasztásában) a Bauer-féle képlet nem alkalmas az elméleti érdesség leírására [13]. A 2. változat szerszámát ($ECEA=5^\circ$) alkalmazva az elméleti érdesség tökéletesen leírható. A polinom függvény (technikai parabola) szorosságának értéke azért nem $R^2 = 1$, mert a konstansok kerekített értékek.

Az aktív mellékél új megközelítést ad mind az elméleti érdesség számítására, mind pedig a szerszámok várható viselkedésének előrejelzésére. A (7) egyenlet alapján számított eredményeket a 6. ábra tartalmazza, mégpedig a kritikus előtolásnál nagyobb adatok esetében. A közölt elméleti érdességképletek konstansai kerekítettek, ezért a szorosság (R^2) kisebb, mint 1,00.



6. ábra: Az elméleti érdesség alakulása aktív mellékél esetén (Tartó: xCLxx jelű, lapka: „C” alakú)

2. ÉRDESSÉGI VIZSGÁLATOK KÜLÖNBÖZŐ LAPKÁK ESETÉN

Az esztergálásnál előforduló feladatokhoz különböző kialakítású szerszámok szükségesek attól függően, mekkora szerep jut a geometriai kötöttségeknek, a gyártási pontosságnak vagy az elérni kívánt felületi érdességnek. A korszerű gyártóipar azokat az előgyártmányokat részesíti előnyben, amelyeknél a kis ráhagyás („near net shape”-szemlélet) következtében a forgácsolási igény minimálásra csökkenthető. Ez egyben azt is jelenti, hogy csak az illesztésre szánt és/vagy szűk tűréssel ellátott (kritikus) felületek igényelnek precíz megmunkálást. Ennek a ténynek a felismerése vezette azokat a szerszámgyártókat, amelyek – a mérsékelt terhelés elviselésére képes – kisebb élhosszúságú és vastagságú lapkákat kezdtek forgalmazni.

A különféle kialakítású esztergaszerszámokkal elvégzett szisztematikus teszt sorozat a felületi érdesség alakulásának vizsgálatára fókuszált. A forgácsoló szerszámok ún. érdesség-tartó képessége az a tulajdonság, amely révén – egy meghatározott ideig előre tervezhetően – sikerül közel állandó értéken tartani a paramétereket [14]. A szerszám kopása, amely a forgácsoló képesség romlásával (degradáció) függ össze, azonban a megmunkált felület érdességi adatait is befolyásolja. A rövid idejű tesztelésre való tekintettel az elhasználódásból következő felületi változásokat itt nem taglaljuk.

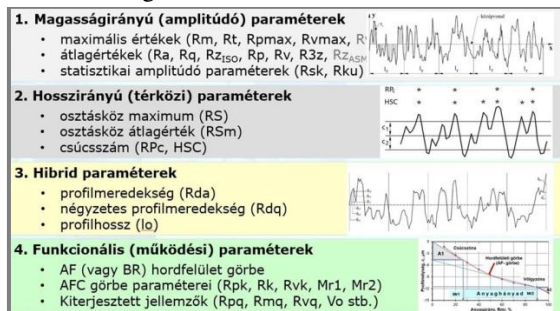
A különböző kivitelű és rendeltetésű lapkák összehasonlítása szárazon végzett hosszszesztergálással az 1. táblázatban közölt körülmények mellett történt. A táblázatba szerkesztett ábrákon jól látszanak azok a különbségek, amelyek a szerszámok teljesen eltérő forgácsolási sajátosságait okozzák. Az első változat kis csúcsgugara ($RE=0,4$ mm) és nagy mellékélszöge ($ECEA=32^\circ$) simításra és/vagy kontúresztergálásra való, amely a csúcson végzett leválasztás tipikus jellemzője. A

második mind simító, mind félsimító előtolásokkal végzett hossz- és keresztesztergálásra alkalmas, viszont a csúcshossz mellett a forgácsképzésben aktívan részt vesz a mellékél (szöge: $ECEA=5^\circ$) is, így nyomot hagy a megmunkált felületen.

1. Táblázat Összehasonlító vizsgálat adatai

Gép: BNC1840 (Próbadarab 11SMn30 (1.0715)
1. változat	2. változat
Tartó: SDJCR 2525 M11	Tartó: HCLNR 2525 M09
Lapka: DCMT11T304-PF Anyag: GC4315 (Sandvik)	Lapka: CNMG090408-FG Anyag: TT8115 (TaeguTec)
Jelleg: simító esztergálás	Jelleg: félsimító esztergálás
Előtolás, f, mm: 0,08...0,25	Előtolás, f, mm: 0,1...0,35
Fogásmélység, a, mm: 1,5 (egységesen)	
Forgácsolósebesség, v_c , m/min: 250 (egységesen)	
1. változat	2. változat

A $\varnothing 90 \times 120$ mm méretű próbadarabokat Perthen-Mahr CONCEPT érdességmérővel minden egyes felületet három, 120° -os szögosztásban lévő alkotó mentén vizsgáltuk meg, a felhasznált tapintó típusa: MFW-250:1 volt. A mérési eredményeket a Mahr cég MarWin szoftverével dolgoztuk fel.



7. ábra: Az érdességi jellemzők összegző csoportosítása

A program kirajzolja az értékelt (mért) profilt 3500...11000 pontban (5-5 alaphosszt felhasználva), 23-féle érdességjellemzőt határoz meg, amelyeket az ISO, az ASME és a JIS szabványa is definiál, és (akár 10 szinten) kiértékeli a profil hordfelületi (anyaghányadi) jellemzőit.

A tapintóval mérhető (2D-s) érdességi paraméterek összefoglaló csoportosítását a 7. ábra mutatja be a [15] alapján. Az ábrán szereplő paraméterek között néhány jól ismert van (R_a , R_q , R_z , R_t stb.), az összefoglaló azonban olyan jellemzőket is tartalmaz, amelyeket csak az ipar bizonyos szektorában (autó- és repülőgépgyártás, energetikai berendezések stb.) használnak például tömítési vagy kenési problémák megoldására.

Korábbi vizsgálatainkban már bemutattuk, hogy nem csak az azonos paramétercsoportba tartozó jellemzők (tehát pl. R_z - R_a) között szorosak az összefüggések [16], hanem

azt is bizonyítottuk, hogy a különböző csoportok egyes érdességi mérőszámai (pl. R_z - R_{Sm}) között is determinisztikus kapcsolat van [15].

A következő alfejezetekben azt igazoljuk, hogy ezek a korrelációs kapcsolatok törvényszerűek, bármilyen kialakítású szerszámról is van szó.

2.1 Az amplitúdó paraméterek vizsgálata

Az érdesség profilelemekből, azaz kiemelkedésekből és völgyekből épül fel, ennek képi (grafikus) megjelenítésére a magassági és a hosszirányú (térközi) paraméterek szolgálnak. A határozott élgeometriájú szerszámokkal végzett anyagleválasztás mindegyike periodikusan ismétlődő nyomokat hagy a felületen. Esztergálásnál a völgyek létrehozásában a szerszámcsúcs vesz részt, és azok olyan mértékben szabályosak, amilyen pontossággal történik azok kialakítása. Ez pedig összefügg a munkadarab anyagával, a szerszámmal, a megmunkálógéppel, rezgések fellépésével stb.

A magasságirányú paraméterek három nagy csoportba sorolhatóak (7. ábra). Az osztályozás elve a méréssel meghatározott adatok száma és az így eredményként kapott különböző jellemzők megbízhatósága. Ennek alapján a következő kategóriák léteznek:

- a paraméterek *maximális* értékének mérése (R_t , R_{max} , R_{pmax} , R_{vmax}) csupán *egyetlen* adatot állít elő, amely az egész mérési hosszra (l_m) vonatkozik. Az így nyert adat nem kellően megbízható, mert eseti jellemző,
- az *átlagos* értékek jóval pontosabbak, mert a mérési hossz általában *öt darab* alaphosszt (l_n) tartalmaz. Ilyen jellemzők például az elterjedt R_a , továbbá a felületről több információt magában foglaló R_q és R_z . Az utóbbi jellemzőnek több definíciója is létezik a világban, ezért a használatával vigyázni kell.
- az R_{sk} és R_{ku} *statisztikai* jellemzők ipari használata még nem elég gyakori. Ennek elsősorban az az oka, hogy az ismételt mérések során ugyanazon felületről nagyon szóródó értékeket ad a ferdeség (R_{sk}) és a lapultság (R_{ku}).

A következőkben a kiválasztott szerszámokat típusonként hasonlítjuk össze hatféle előtolásnál, 3-3 helyen megmérve.

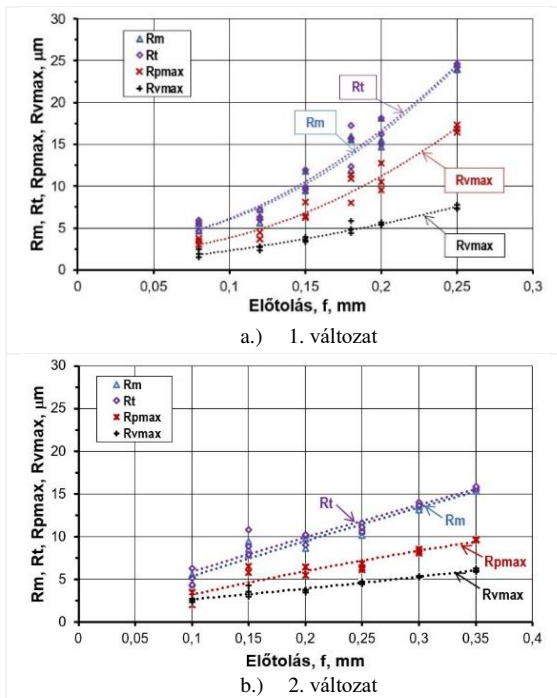
2.1.1 A maximális amplitúdó értékek alakulása

A kétféle kialakítással esztergált felületek maximális érdességi jellemzői a 8. ábrán láthatók az alkalmazott előtolás függvényében.

Mindhárom paraméter mért érdességi adatai nagyon szoros ($R^2 > 0,95$) másodfokú polinommal közelíthetők. A páros diagramon a mért jellemzők skálabeosztása azonos. A maximális érdesség paraméterekre a következő összefüggés írható fel:

$$R_t = R_{pmax} + R_{vmax} \quad [\mu m],$$

azaz a teljes profilmélység (R_t) a csúcshossz (R_{pmax}) és a völgyek (R_{vmax}) maximális értékeinek összege, amint ezt számadatokkal is bizonyítják a következő modellek.



8. ábra A maximális amplitúdó értékek az előtolás függvényében

Az ábrák összevetésekor a következő megállapítások tehetők:

- az 1. változatnál (csúcson történő esztergáláskor) az előtolás növelése az összes vizsgált paraméternél progresszív érdességromlással jár. A modelltől kapott összefüggések:

$$\begin{aligned} R_m &= 377 \cdot f^2 - 9,7 \cdot f + 3,2 \quad [\mu\text{m}] \\ R_t &= 457 \cdot f^2 - 38 \cdot f + 5,5 \quad [\mu\text{m}] \\ R_{p\text{max}} &= 355 \cdot f^2 - 34 \cdot f + 3,5 \quad [\mu\text{m}] \\ R_{v\text{max}} &= 102 \cdot f^2 - 4 \cdot f + 2,0 \quad [\mu\text{m}] \end{aligned}$$

Látható, hogy a fenti jellemzők esetén a másodfokú tag együttthatója egy nagyságrenddel haladja meg a lineáris tag hasonló jellemzőjét, és minden egyes érdesség jellemzőnek minimumos szélsőértéke van az előtolás függvényében;

- a második változat esetén (ahol a mellékél aktívan vesz részt a forgácsképzésben) összességében degresszív változást mutat. A kapott összefüggések:

$$\begin{aligned} R_m &= 9,7 \cdot f^2 + 44 \cdot f + 1,1 \quad [\mu\text{m}] \\ R_t &= -12 \cdot f^2 + 44 \cdot f + 1,6 \quad [\mu\text{m}] \\ R_{p\text{max}} &= -19 \cdot f^2 + 33 \cdot f + 0,1 \quad [\mu\text{m}] \\ R_{v\text{max}} &= 7 \cdot f^2 + 11 \cdot f + 1,5 \quad [\mu\text{m}] \end{aligned}$$

Ebből az derül ki, hogy az előtolás lineáris változása domináns jellegű, a másodfokú tag viszont lényegesen kisebb hatást gyakorol függvény értékére;

- a maximális érdesség jellemzők tekintetében az első változatnál az $R_m \approx R_t$ relációja állapítható meg, míg a 2. változatnál elvégzett vizsgálatoknál az R_t – nagy szóródása következtében – meghaladja az R_m értékeit;
- a diagramok összevetéséből az derül ki, hogy az adott érdességet nagyobb termelékenységgel lehet elérni a 2. változat alkalmazásával. Így például az $R_{t_{\text{előt}}=15 \mu\text{m}}$ esetében a növekedés akár az 50%-ot is elérheti.

Megállapítható, hogy a két változat érdesség-előállító képessége teljesen eltérő: míg a csúcson dolgozó

szerszámnál (a forgácsolásmélettel megegyezően) az előtolás „parabolikus” hatása látszik, addig a három élszakaszos leválasztásnál ez a jelleg nem figyelhető meg. A mért maximális értékek szóródása – a várakozással megegyezően – mindkét változatnál nagy mértékű.

2.1.2 Az átlagos amplitúdó értékek (R_a , R_q)

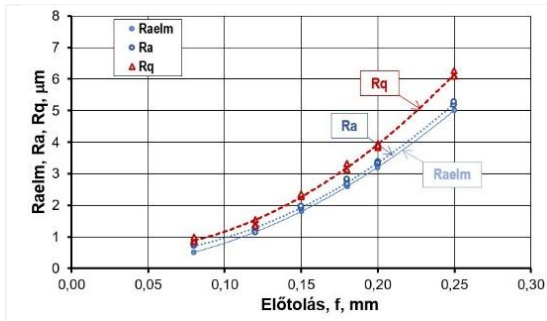
A magasságirányú értékek legelterjedtebb képviselője az *átlagos érdesség*, amely a vizsgált profinnál az amplitúdó (y_i) *abszolút* értékeinek *átlagos* eltérése a középvonalhoz képest az l_n kiértékelési hosszra vonatkoztatva. Tekintettel arra, hogy a műszaki rajzok nagy hányadán az R_a érték a feltüntetett érdességi jellemző, az esztergálási műveletek előkészítésekor fontos feladatot jelent a felületi érdesség elméleti értékének ($R_{a\text{elm}}$) számítása. Az elméleti átlagos érdesség meghatározására sok képlet jelent meg a szakirodalomban [11, 17], jelen dolgozat az

$$R_{a\text{elm}} = \frac{1000 \cdot f^2}{18 \cdot \sqrt{3} \cdot RE} \quad [\mu\text{m}] \quad (9),$$

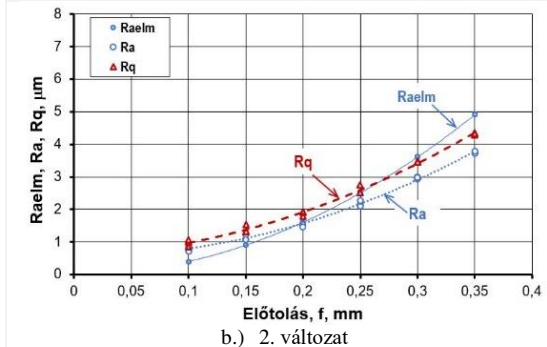
Brewer által bevezetett képlettel számol. A másik jól ismert paraméter a simasági mérőszám (R_q), amely a profil *négyszetes* eltérését mutatja a középvonalhoz képest, ezért nyilvánvalóan nagyobb értéket mutat. A 9. ábra a két eltérő változat átlagos érdességi és simasági mérőszám adatait szemlélteti (a regressziós görbék feltüntetésével), az átlagos elméleti érdesség számított értékét pedig szaggatott vonal jelzi. Az adatok összehasonlíthatósága érdekében a páros diagram azonos skálabeosztású.

Az ábrázolt görbék tendenciáit tekintve kiemelhető, hogy

- az 1. változatnál a (9) képlet alapján számítással ($R_{a\text{elm}} \approx 80,2 \cdot f^2 \quad [\mu\text{m}]$) kapott és a méréssel megállapított átlagos érdességi adatok alig különböznek egymástól. A simasági mérőszám természetesen nagyobb értéket mutat, és a mért R_q adatok feldolgozásakor – a kis előtolásoknál bekövetkező bizonytalan forgácsleválasztás miatt érthetően – a technikai parabolamoddell mutatott nagyobb szorosságot;
- a több forgácsoló élszakasz miatt az elméleti érdesség számított értékei ($R_{a\text{elm}} \approx 40,1 \cdot f^2 \quad [\mu\text{m}]$) a 2. változatnál nem felelnek meg. A mért átlagos érdesség és a simasági mérőszám adatok előtollással való összefüggésének leírására szintén megfelelőbb a technikai parabolamoddell;
- a vizsgált két változat közül a másodikkal érhető el kedvezőbb eredmények, ami természetesen az utóbbi kétszeres csúcscsugarával magyarázható. Megjegyezzük, hogy az élcsúcson végzett esztergáláskor a szerszám 8-18%-kal kisebb élszakasszal vesz részt a forgácsolásban (gyakorlati elnevezés szerint: „hegyesebb a szerszám”), mint amikor a mellékél is dolgozik.



a.) 1. változat



b.) 2. változat

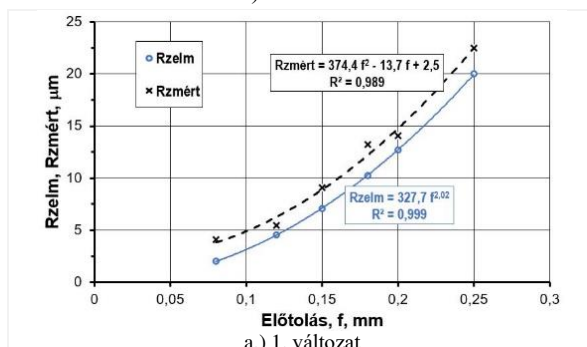
9. ábra: Az átlagos amplitúdóértékek az előtolás függvényében

Elterjedtsége következtében az átlagos érdesség nehezen kihagyható jellemző. Az Rq simasági mérőszám azonban nem csak korrektebb értékeket ad a felületre, hanem az átlagos érdességnél több információt tartalmaz is. Egyes szakértők szerint az Rq csak a kutatóknak megfelelő paraméter, a későbbiekben azt bizonyítjuk, hogy ez nem teljesen helyes álláspont.

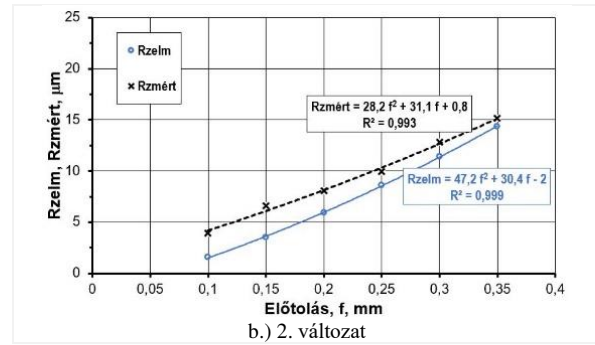
2.1.3 Egyenetlenség magasság, csúcsmagasság és völgymélység ($Rz - Rp - Rv - R3z$)

A magasságirányú (ún. csúcs-völgy) értékek meghatározó képviselője az *egyenetlenség magasság*. Definíció szerint az egyenetlenség magasság a vizsgált (például 5 darab) l_r alaphosszra megállapított egyenetlenségek *átlagértéke*, tehát az l_n kiértékelési hosszra értelmezett. A Rz definíciójából következik, hogy a csúcsmagasság (Rp) a legmagasabb, a völgymélység (Rv) pedig a legmélyebb távolságot jelenti a kiértékelési hossz.

Az előző alfejezet szerint az elméleti érdesség számítóképletei az esztergált profil egyenetlenség magasságát jelentik, mivel a periodikusan ismétlődő előtolások hozzák létre. A vizsgált kétféle szerszám esetén az elméleti értékek és a 18 darab méréssel meghatározott adat összehasonlítása a 10. ábrán látható. (Az adatok egyszerűbb összehasonlíthatósága érdekében a diagramok skálabeosztása azonos.)



a.) 1. változat

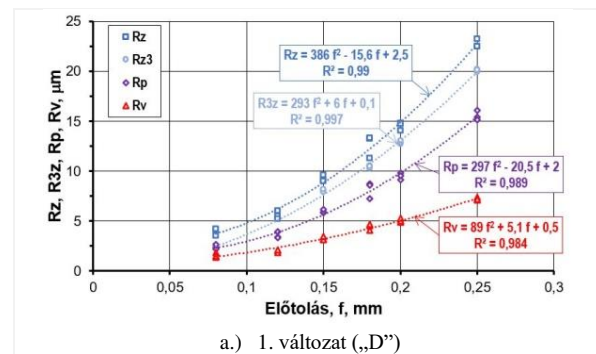


10. ábra: Az elméleti és a mért Rz értékek összehasonlítása

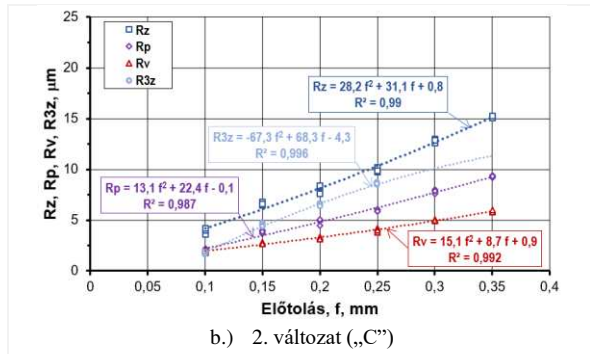
A diagramokból az alábbi következtetések vonhatók le:

- az első változat esetében a mért Rz érdesség jelentősen szóródik a beállított előtolásoknál, ezért a teljes vizsgálati tartományban csak a polinom alakú közelítés (10/a. ábra) alkalmazható. Az elméleti érdesség (Rzelm) szorossági indexe – bár (analog) függvénykapcsolatról van szó – azért nem $R^2=1$, mert a konstansok kerekítettek. Az elméleti és a mért értékek közötti eltérés egyenletes és átlagosan kb. 2,5 μm . A különbség elsősorban az anyagfeltapadásokkal magyarázható, de szerepet játszanak ebben a rezgések is;
- a jóval kisebb érdességet eredményező második változat az összes beállított előtolás függvényében adja meg az elméleti és a mért, kis szóródást mutató Rz adatokat (10/b. ábra). A vizsgált széles előtolás-tartományban az első és másodfokú tagok közötti különbség nem jelentős, ami arra utal, hogy a rádiusz és a mellékél egyenrangú mind a (7) összefüggés szerint számított elméleti, mind a méréssel meghatározott értékeknél. Az elméleti és a mért értékek közötti eltérés főleg a kisebb előtolásoknál jelentős. Ennek elsősorban az az oka, hogy az f_{krit} előtolásnál kisebbet is beállítottunk, ezért zártabb a forgácstér, így a leváló forgácsok megsértik a már kialakított felületet.

Az *alapérdesség magasság* (R3z) értelmezése nagyon hasonlít az Rz-re, azonban az R3z a *harmadik* legmagasabb csúcs és a *harmadik* legmélyebb völgy átlagos távolságát jelenti a kiértékelési hosszon értelmezve. Ennek értéke értelemszerűen kisebb, mint az Rz mért adata. A 11. ábra kétféle kialakítású szerszám esetén az egyenetlenség magasság kétféle értékét (Rz, R3z) és annak meghatározó paramétereit ($Rz=Rp+Rv$) szemlélteti. A diagramok skálabeosztása ezúttal is azonos.



a.) 1. változat („D”)



11. ábra: Az egyenetlenség magasság paraméterei

A páros diagramból az alábbi következtetések vonhatók le:

- a csúcsmagasságok (R_p) és völgymélységek (R_v) között nagyon szoros a kapcsolat, így azok képletének konstansai – kis hibával – az R_z függvény együtthatóit adják meg;
- az *első változatnál* az előtolás függvényében felírt törtkitevős hatványfüggvény modell (pl. $y = A \cdot x^B$ alakú) egyszerűbb ugyan, azonban nem tudja adekvát módon leírni a felületi érdesség változását. A 11/a. ábra polinomos közelítésekor minden egyes görbe alakulását döntően a másodfokú tagok határozzák meg, míg az elsőfokúak konstansai egy nagyságrenddel maradnak el az előbbiektől;
- a *második szerszámváltozatnál* az előtolás másodfokú polinom alakban felírt modellje (pl. $y = A \cdot f^2 + B \cdot f + C$) nagyon szorosan ($R^2 > 0,98$) illeszkedik mind a négyféle mérési adathoz. A felületi érdesség alakulását ennél a konstrukciónál egyforma mértékben befolyásolják a lineáris és a másodfokú tagok. Az R_p és az R_v paramétereket leíró függvények szintén az egyenetlenség magasság képletének együtthatóit jelenítik meg. Az R_{3z} jellemző csak négy előtolás adatát (háromszori ismétléssel) tartalmazza, ugyanis nagy előtolásoknál ($f > 0,25$ mm) a műszer nem tud „harmadik” kiugró egyenetlenséget megállapítani, ezért a kapott modell is eltér az ennél a változatnál megszokottól.

Az elemzés azt mutatja, hogy az R_z egyenetlenség magasság paraméter a mért érdességi profil változásaira sokkal érzékenyebben reagál az R_a átlagos érdességhez viszonyítva. Az amplitúdók sokkal (legalább négyszer) nagyobbak, azonban a csúcsok és völgyek egyes pontjainak letapogatási/követési pontossága ingadozó, ezért a mérési eredmények szóródása is nagyobb. Az utóbbi években készült modelleken/rajzokon egyre több helyen van feltüntetve az R_z értéke. Egyértelmű elterjedését a tény hátráltatja, hogy az R_z definíciója néhány nemzeti (JIS) vagy szervezeti (DIN) szabványban eltérő.

2.1.4 A statisztikai amplitúdóértékek alakulása

Az eloszlásokat leíró matematikai statisztikában az átlag, variancia, statisztikai nyomatók stb. jól ismert fogalmak. A megmunkált felületek érdességének magasságirányú eltéréseinek vizsgálatára szintén ezek alkalmazhatók, az alábbiak szerint:

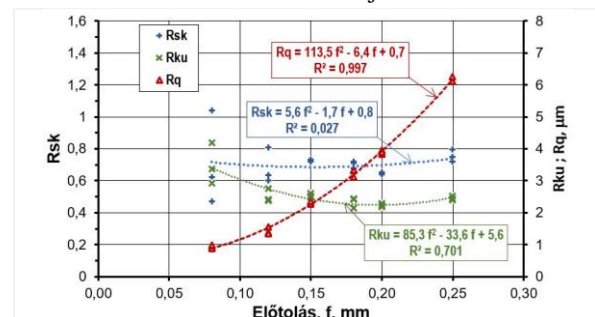
- az eloszlásgörbéből az R_q átlagos érték számítható;
- az R_q^2 variancia (vagy szórásnégyzet) az eloszlás *másodrendű* nyomatóka;

- az R_{sk} ferdeség az amplitúdó-eloszlás *harmadrendű* centrális nyomatóka, amely a profilnak a középvonalhoz viszonyított szimmetriáját jellemzi. Azt írja le, hogy a megmunkált felület érdességének eloszlása balra ferde, azaz teli profilú ($R_{sk} < 0$), normális ($R_{sk} = 0$) vagy pedig jobbra ferde, vagyis üres profilú ($R_{sk} > 0$);

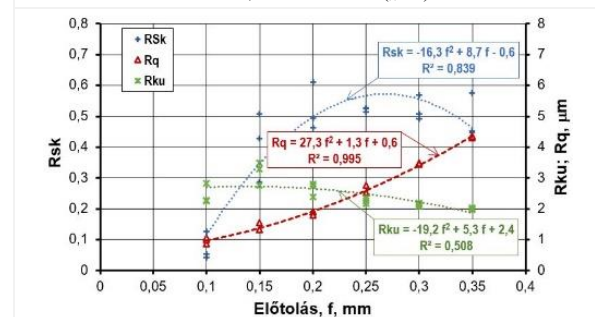
- az R_{ku} lapultság (más helyeken csúcsosság) az eloszlás alakját „függőlegesen” leíró mutatószám, amely az eloszlásnak *negyedrendű* centrális nyomatóka. Normál eloszlásnál értéke $R_{ku} = 3$, nagy kiemelkedések vagy bemélyedések esetén $R_{ku} > 3$, széles („lapos”) eloszlási görbék esetén $R_{ku} < 3$ lehet;

- a mért simasági mérőszám (R_q) adatok jelentőségét az növeli, hogy a ferdeség kiszámításakor a harmadik, az R_{ku} értékeknél pedig a negyedik hatványon szerepelnek.

A statisztikai amplitúdó értékeket, valamint a simasági mérőszám mért adatait a 12. ábra összesíti. A jobb összehasonlíthatóság érdekében a diagramokat a két változatnál azonos skálabeosztás jellemzi.



a.) 1. változat („D”)



b.) 2. változat („C”)

12. ábra A statisztikai paraméterek alakulása

A diagramok elemzéséből levonható következtetések az alábbiak:

- az *első változatnál* (12/a. ábra) a ferdeséget nagy pozitív értékek ($R_{sk} \approx 0,7$) jellemzik, alig kimutatható változással, a lapultsági értékek pedig $R_{ku} \approx 3$ -ról kicsit csökkennek az előtolás függvényében. Az R_q adatok nagyon jó szorossággal illeszkednek egy technikai parabolához, amelyben a másodfokú tagnak meghatározó szerepe van;

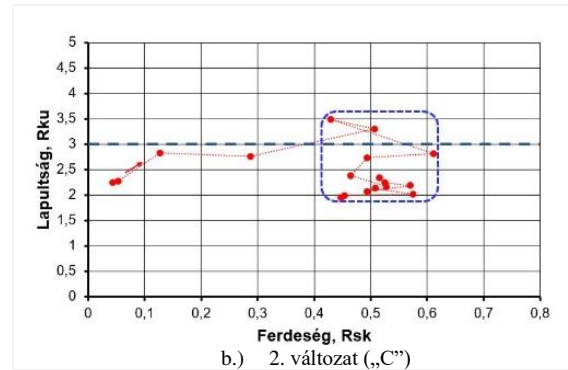
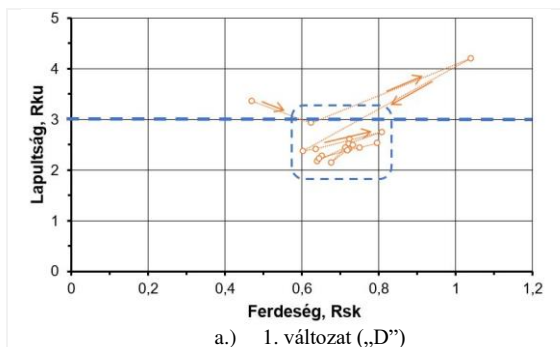
- a 2. változatnál (12/b. ábra) a ferdeség eltérően viselkedik, mert a legkisebb előtolásnál nagyon kis értéket ad, majd egy maximum elérése után ($R_{sk} = 0,4 \dots 0,6$ értékek között) enyhén csökkenő tendenciát mutat. Az *első változathoz* hasonlóan a lapultsági értékek folyamatosan csökkennek. Az R_q adatpontok nagyon szorosan illeszkednek ahhoz a másodfokú

polinom modellhez, amelyben szintén a másodfokú tagnak van meghatározó szerepe.

A statisztikai amplitúdóértékek összefüggő rendszert alkotnak, ha egy felületszakasz egy forgácsolási adatbeállításánál *egyidejűleg* mért ferdeség és lapultság mérőszámait közös koordináta-rendszerben ábrázoljuk [12, 18]. Az így keletkező diagram az ún. topológiai térkép, amely a különböző megmunkálási eljárásokra jellemző, egyedi Rsk-Rku adatpárosokat produkál. A szabályos élgeometriájú szerszámmal végzett forgácsolási módszerekre (esztergálás, fúrás, marás stb.) az Rsk ±1,5 és Rku 2...7 tartományba eső adatok a tipikusak. A szakirodalmak szerint minél inkább jobbra dőlő, azaz a pozitív Rsk tartományban és minél lentebb (Rku < 3) helyezkedik el a mért felület textúrájának paraméterpárosa, annál kedvezőtlenebbek a működés közbeni tulajdonságai (súrlódás, kopás, kenés stb.). Természetesen ritkán szoktak az alkatrész szempontjából fontos, működő felületeket csak esztergálással vagy marással létrehozni.

A 13. ábra a kétféle szerszámmal esztergált 18-18 felületszakasz összetartozó adatait mutatja be. A topológiai térképek feltüntetik a normál eloszlás Rku=3 értékét, valamint az induló (legkisebb) előtolásoknál kapott értékeket, a pontokat összekötő vonalakból pedig az előtolás fokozására bekövetkező tendenciákról vonható le következtetés. A diagramok elemzéséből az derül ki, hogy

- a vizsgált szerszámok mindegyike szinte kivétel nélkül a Rku < 3 paraméterű felületet állít elő, ami a simító vagy félsimító esztergálással megmunkált felületeknél *általánosnak* mondható;
- az 1. változatot (13/a. ábra) a lapka csúcsgarához (RE = 0,4 mm) igazodóan egy kisebb (f = 0,08...0,25 mm) előtolás-tartományban teszteltük, és nagy, pozitív (Rsk 0,6...0,8) ferdeségeket és Rku 2...3 határok közötti értékeket mértünk, vagyis ezzel a szerszámmal esztergált felületek – a kiemelkedéseik miatt – kopásra hajlamosabbak;
- a második változatnál a csúcsgár 0,8 mm volt, ezért az f = 0,1...0,35 mm beállítási határok között esztergáltunk (13/b. ábra). Kis előtolásoknál (f ≤ 0,15 mm) nagyon kis ferdeséget (Rsk 0,05...0,5) mérhettünk 2,2...3,5 lapultsági értékek mellett, ami a megnövelt csúcsgárnak volt köszönhető. A növelt előtolásoknál a ferdeség fokozódását (Rsk 0,45...0,6) tapasztaltuk. Az Rsk-Rku pontpárok vonalas összekötéséből jól látható, hogy növekvő előtolásoknál egyre kisebb Rku értékek mutathatók ki.



13. ábra: Esztergált felületek topológiai térképei

Ezek alapján úgy véljük, hogy a statisztikai amplitúdó-paraméterek alkalmazása megfelelő eszköz a különféle kialakítású szerszámok közötti különbség egyértelművé tételéhez. Amennyiben az egyes beállításoknál a méréseket legalább háromszor megismételjük, az adatok szórása ellenére is viszonylag tiszta képet kapunk a tesztelt konstrukció érdesség-előállító képességéről. A topológiai térkép felhasználható a hosszabb távú üzemeltetés szempontjait figyelembe vevő adatkombinációk kiválasztására is.

2.2 A hosszirányú (térközi) paraméterek vizsgálata

Az érdességi profilon jól felismerhető szerszámnyomok a hosszirányú paraméterekkel jellemezhetők, ezért a beállított előtolással összefüggő térközi jellemzők akár triviálisnak is tekinthetők. Az érvényben lévő szabványok a szűrt profil négy, hosszirányú jellemzőjét különböztetik meg az l_n alaphosszon értelmezve, mégpedig

- az átlagos osztástávolság (RSm) a középvonal feletti kiemelkedéseknek és az alatta lévő mélyedéseknek (azaz a profilelemeknek) az érdességi karcokra mérőleges, átlagos szélessége;
- az osztás (RS), ami teljesen hasonlóan értelmezett, azonban a szerszám és a megmunkált felület pillanatnyi állapotával (kopás, rezgés stb.) függ össze, az RS általában kisebb az RSm-nél, azonban egyes esetekben meg is haladhatja annak értékét;
- az R_{Pc} paraméter a periodikus érdességi profil legnagyobb kiemelkedéseinek száma, 10 mm hosszra vonatkoztatva;
- a HSC – a mérőszoftver által kiválasztott mélységben – a nagyobb kiemelkedések számát adja meg, szintén 10 mm hosszra.

A definíciókból is jól látható, hogy a kiemelkedések egységnyi hosszra vonatkoztatott száma kettős természetű: a legnagyobb csúcsok inkább az amplitúdó- paraméterek kategóriájába tartoznak, a vizsgálat 10 mm-re vonatkoztatott értéke pedig egyértelműen térközi jellemző.

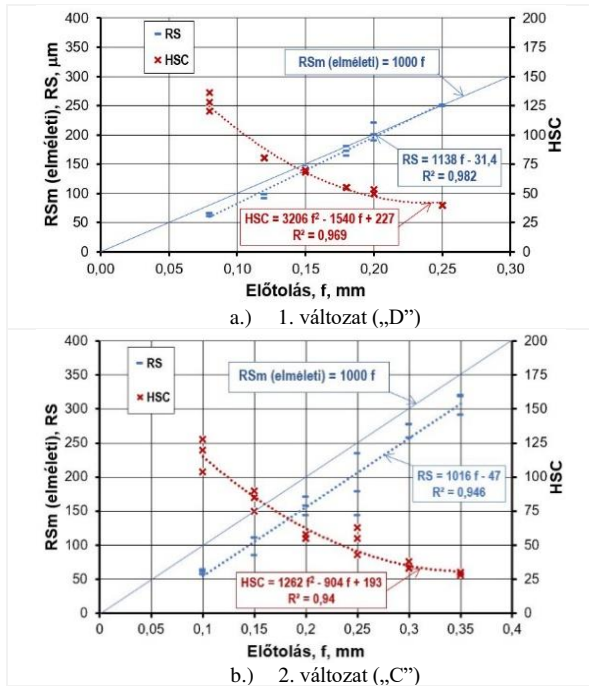
A vizsgált szerszámok érdesség-előállító képességét jelen anyagunkban csak két paraméterével jellemezzük. Ennek az oka, hogy az átlagos osztás (RSm, μm) elméletileg az előtolással egyezik meg (millimikronban kifejezve), a R_{Pc} pedig annyit jelez, amennyi előtolás nyom jut 10 mm-re. Képletben ez a következőképpen írható:

$$RSm \cdot R_{Pc} \cong 10000 \quad [\mu\text{m}] \quad (10),$$

miel azonban az R_{Pc} (miként a HSC is) csak *egész* szám lehet, ezért a közölt képlet csak *közéltőleg* érvényes.

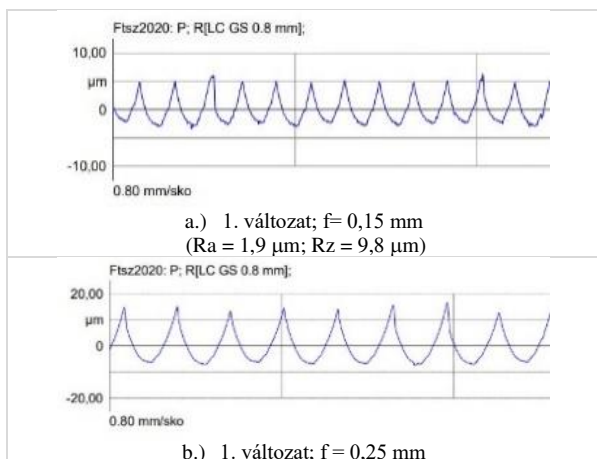
A 14. ábra az RS osztásértékek és a HSC kiemelkedések számának alakulását szemlélteti az előtolás függvényében.

A diagramokat elemezve az állapítható meg, hogy a kétféle konstrukció között csak nagyon kis eltérés fedezhető fel, azok kialakulásáért is döntően a mérési adatok szóródása a felelős. A csekély különbség érthető is, hiszen a hosszirányú jellemzőket egyedül a forgácsolás kinematikája, mégpedig az egy fordulatra jutó előtolás határozza meg.

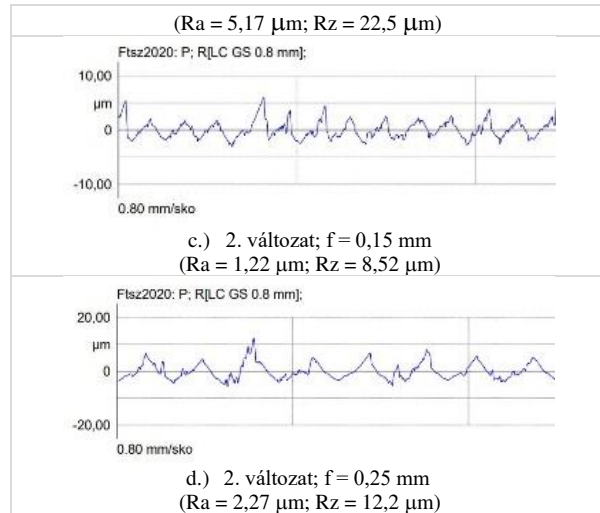


14. ábra Az esztergált felületek térközi paraméterei

A 15. ábra előtolás páronként, egyező „cut-off” mellett szemlélteti a felület egyenetlenségeit, míg a valós értékekről a diagramoknál feltüntetett érdességi mérőszámok adnak tájékoztatást. A felvett profilok főleg a nagyobb előtolás esetén igazolják meggyőzően a rádiuszon történő forgácsolás tényét az 1. változatnál, míg a több élszakaszos forgácsolásnál természetesen a felületi profil több részletből tevődik össze. Ezzel magyarázható az RS paraméter eltérő alakulása is, ugyanis a 2. változatnál az osztások „megrövidülnek” a mellékél aktív szerepe miatt.



b.) 1. változat; f = 0,25 mm



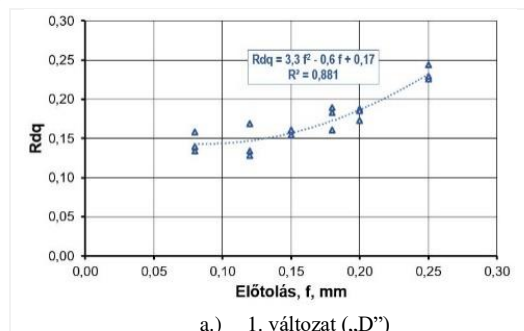
15. ábra: Az esztergált felületek szűrt profildíagramjai

2.3 Az érdesség hibrid paraméterei

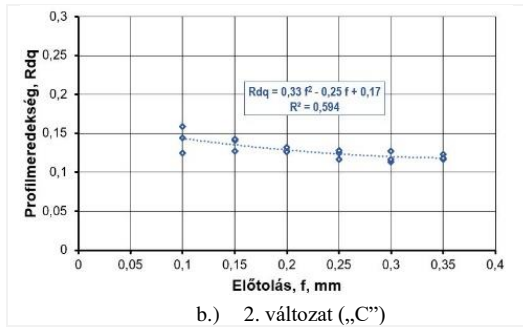
A kevert paraméterek *egyesítik* az amplitúdó-paramétereket és a térközi jellemzőket, ezért bármelyikük megváltozása befolyásolja a (majdani kapcsolódó) felület olyan fontos tulajdonságait, mint például a súrlódást, a terhelés közbeni rugalmas deformációt, a felület tribológiai viselkedését vagy éppen a kenési sajátosságait.

A korszerű érdességmérő műszerek egy-egy profilról legalább 10 000 pontot rögzítő mintát vesznek fel, ezért a hibrid paraméterek kiértékelése meglehetősen számításigényes. Leggyakrabban kétfajta paramétert alkalmaznak: az egyik a vizsgált profil meredekségét fejezi ki (R_{dq}), míg a másik a megmunkált profil hosszára utal (I_o , R_{I_o}). Megjegyezzük, hogy a különböző műszergyártók (a nemzeti szabványoknak megfelelően) más-más érdességjellemzők szoftveres számítását részesítik előnyben.

Az általunk vizsgált hibrid paraméter a profilmeredekség, amely alapesetben két, egymást követő profilpont függőleges (δ_{yi}) és vízszintes (δ_{xi}) távolságának hányadosát jelenti, azaz a profilt alkotó egyenesek hajlásszögének tangensét adja meg. A négyzetes meredekség (R_{dq}) a profilmagasság *négyzetének átlagos* változását adja meg az értékelési hosszra vonatkoztatva [19].



a.) 1. változat („D”)



16. ábra: A profilmeredekség alakulása

A 16. ábra az előtolás függvényében adja meg 18-18 felület négyzetes meredekségének értékeit. A diagramok tanúsága szerint a kétféle kialakítás szerszám teljesen másként viselkedik. A növekvő előtolások beállításakor az első változat egyre növekvő meredekségű profilokat állít elő, míg a több élszakasszal dolgozó konstrukció alkalmazásakor a meredekség folyamatosan csökken. Ezek a tendenciák jól felismerhetők a 15. ábrán szereplő profildiagramok képein is.

Az elemzésre kiválasztott Rd_q hibrid paraméter értékei kis változást mutatnak, viszont a szóródásuk nagy. A kétféle szerszám összehasonlításához mégis megfelelő, mert eltérő esztergálási körülmények között is jól tükrözi a változatok eltérő érdesség-előállító képességét.

2.4 Az érdesség funkcionális paraméterei

Az alkatrészek kritikus felületeit az előzőleg részletesen tárgyalt magassági, térközi és hibrid paraméterekkel jellemezzük, ellenőrizzük és minősítjük, a funkcionális érdességi paraméterekből pedig a működés közbeni viselkedésükre következtethetünk [8].

A 17. ábra az ISO 13565-2 szabvány szerint három sávra osztott profildiagramot mutat be a [20] alapján. A függőleges tengelyen, tetszőleges mélységben felvett „c” vonal pedig azt mutatja meg, milyen százalékos arányt ér el ($Rmr(c)$, %) az $L_1 \dots L_n$ metszett szakaszok összege az értékelési hosszhoz (L_n) viszonyítva. A különböző (felvett) metszésekkel tagolt felület legkiemelkedőbb része a csúcshólyag, az alatta levő, leginkább terhelhető övezet a maghólyag, míg a völgyhólyag a mélyedéseket tartalmazza.

A hordfelületi görbe (másképpen AFC-diagram) ordináta irányban a magassági (amplitúdó) eltéréseket tartalmazza, a következő elnevezésekkel:

- Rpk : redukált csúcsmagasság, azaz a csúcshólyag kiemelkedő csúcsainak (a magprofil feletti) átlagos magassága,
- Rk : maghólyag-érdesség, azaz a mag profiljának érdességi mélysége,
- Rvk : redukált völgymélység, azaz a völgyhólyag átlagos völgymélysége (a magtól az anyag megmunkálás által nem érintett vonaláig tart).

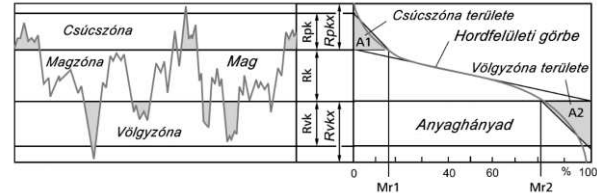
Megjegyezzük, hogy az $Rpkx$ (legmagasabb profilú csúcsmagasság) és a $Rvkv$ (legmélyebb völgymélység) paramétereit az ISO 13656-2 tartalmazza, amelyet a különleges rendeltetésű felületek gyártására (ún. plateau finishing operations) és minősítésére kidolgozott ISO 13656-3 szabványban foglalnak össze.

Az AFC diagram az amplitúdó irányában az alábbi közelítéssel írható le:

$$Rz \approx cmax \approx Rpk + Rk + Rvk \quad [\mu m] \quad (11),$$

ahol a profilmélység maximumát ($cmax$) első közelítésben a csúcs-, mag- és völgyhólyag alkotják, ez a méret azonban *csak közelítőleg* egyenlő az Rz egyenetlenség magasság értékével.

A hordfelületi görbe abszcisszáján az *anyagarány* százalékos értékei szerepelnek, amelyek a következők:



17. ábra: A hordfelületi görbe jellemzői

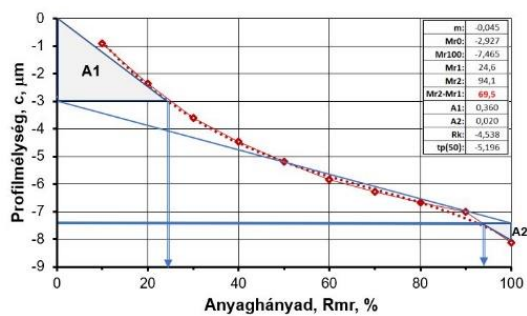
- maghólyag: a *legkisebb* emelkedésű egyenes *minimum* 40%-os szakasza, amely az anyagarány-görbét magterületre és további két zónára osztja fel,
- $Mr1$: a legkisebb anyagarány a magérdesség felső határán, %,
- $Mr2$: a legnagyobb anyagarány a magérdesség alsó határán, %.

A felület pillanatnyi működésével és jövőbeni viselkedésével kapcsolatban a hordfelületi görbe két jellegzetes területe a csúcshólyag (jele: A1), a felület elhasználódásának leginkább kitett része, míg a másik anyaghiányos tartomány a kenőanyag befogadására alkalmas a völgyhólyag (jele: A2).

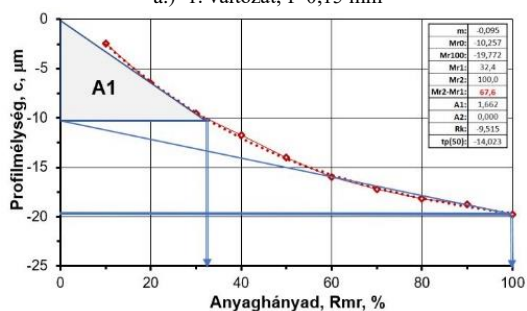
A kétféle kialakítású szerszámmal esztergált felületek 3-3 mérésből átlagolt hordfelületi görbét a 18. ábra mutatja be. Megjegyezzük, hogy az így ábrázolt görbe és a kiszámolt értékek tíz darab összetartozó $c_i - Rmr_i$ adatpárosa épülnek, ezért korlátozott pontosságúak. Itt kell megjegyezni, hogy egyes mérőszoftvereknél a funkcionális paraméterek szempontjából újra lehet értékelni az egyszer már felvett érdességi adatokat, mégpedig a „Magérdesség” rádiógombra történő kattintással. Ilyenkor Rk , Rpk , Rvk , $Rpkx$, $Rvkv$, $Mr1$, $Mr2$, $A1$, $A2$, V_0 jellemzőket is kiszámítja a program.

A 18. ábra diagramsorozatának elemzéséből az alábbi következtetések vonhatók le:

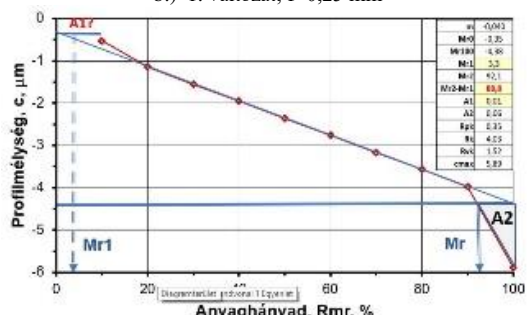
- a diagramokon csak részben ismerhető fel a „klasszikus” hordfelületi görbe (amelyet alakja miatt szokás „S” görbének is nevezni), ami a mintavételezés diszkrét értékeivel ($\pm 10\%$) függ össze;
- az 1. változatnál meghatározóak a profilmélység nagy értékei, ami a forgácsleválasztás körülményeivel (nevezetesen a beállított előtolással és a csúcssugar méretével) függ össze. Ennek az a következménye, hogy a maghólyag anyaghiányada 70% alatt marad, míg a legnagyobb előtolás beállításakor az A2 zóna annyira eltörlődik, hogy az esztergált felület kenése nehézségekbe ütközik;
- a második változat esetében sokkal kedvezőbbek a hordfelületi adatok. A profilmélység nagyarányú változása következtében az Rpk redukált csúcsmagasság értéke, illetőleg a kopásra leginkább hajlamos csúcshólyag (A1) területe drasztikusan lecsökken. Ez különösen kis előtolások alkalmazásakor figyelhető meg.



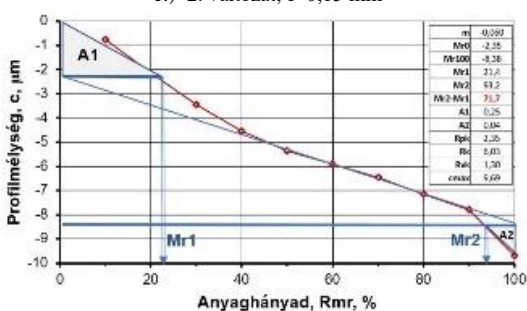
a.) 1. változat; $f=0,15$ mm



b.) 1. változat; $f=0,25$ mm



c.) 2. változat; $f=0,15$ mm

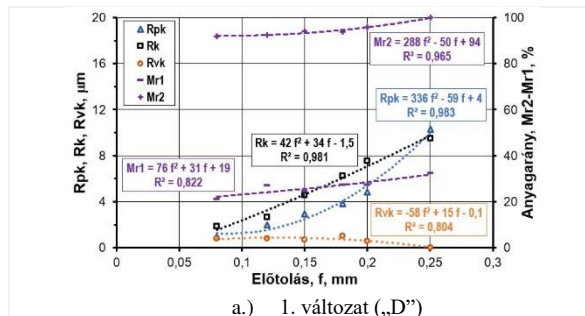


d.) 2. változat; $f=0,25$ mm

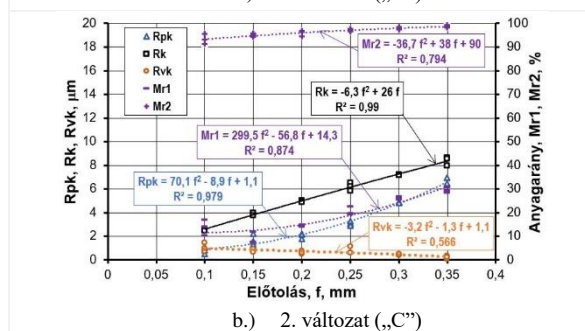
18. ábra: Az esztergált felületek hordfelületi görbéi

A hordfelületi görbéket jelen szócikkben a szerzők ötféle paraméterrel jellemzik: az amplitúdó-eltérések, melyek az Rpk, Rk, Rvk adatok, illetve az anyagarány Mr1 és Mr2 értékei.

A 19. ábra az előtolás függvényében adja meg a jellemzők értékeit és a másodfokú polinommal történő közelítésüket.



a.) 1. változat („D”)



b.) 2. változat („C”)

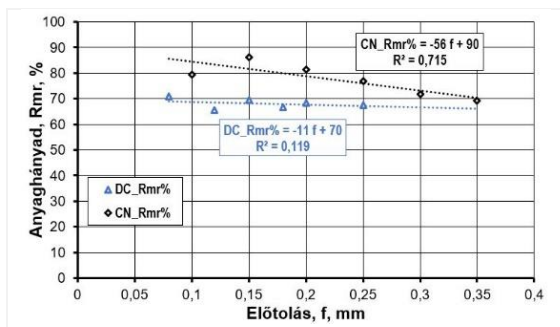
19. ábra: A hordfelületi jellemzők alakulása

A páros diagramok összevetésekor a következőket állapíthatjuk meg:

- mindkét kialakításnál az előtolás és az Rk, Rpk valamint Mr2 jellemzők között nagyon szoros összefüggés állapítható meg, míg az Rvk és Mr1 paraméterek jobban szóródnak, ez magyarázza az R^2 jellemző csökkenését;
- a két szerszám eltérő forgácsolási viselkedésére jól rávilágít a profilmélység összetevőinek (Rpk, Rk, Rvk) alakulása és egymáshoz viszonyított aránya. Míg a magzóna és a redukált csúcsmagasság érdességét egészen más képletek írják le, addig a redukált völgymélység összefüggései hasonlóak;
- az anyagarányok (Rmr, %) közül az előtolás növekedésével (az Rpk és az Rk határai módosulása következtében) az Mr1 értéke mindkét változatnál növekszik, viszont az Mr2 anyagarány mindkét lapkánál hasonlóan alakul.

A ténylegesen teherviselő anyaghányadot (a magérdességet) a legnagyobb és a legkisebb Rmr arány különbsége adja meg. A precízebb számítás érdekében ezt szoftveres úton úgy oldottuk meg, hogy a „Magérdesség” paranccsal a két változattal készített próbadarabok felületeit újra kiértékeljük és a felületek 3-3 pontján mért hordfelületi görbék adatait átlagoltuk.

A vizsgált változatoknál megállapított Mr2-Mr1 értékeket a 20. ábra tünteti fel az előtolás függvényében. Megjegyezzük, hogy „C” alakú lapkánál sokkal jobb anyaghányad-érték lett volna elérhető, ha az $f=0,1$ mm előtolás adattól eltekintünk (mert $f < f_{krit}$ esete áll fenn). A hordfelület természetéből fakadóan egyébként a kisebb anyaghányad a növelt előtolásoknál mérhető. A két változat összehasonlításakor kb. 14...18% eltérés mutatkozik a második változat javára.



20. ábra: A hordfelületi jellemzők alakulása

A kapott eredmények azt igazolják, hogy a kétféle szerszámalkalítás megkülönböztetésére a funkcionális paraméterek jól alkalmazhatóak. A több élszakaszon forgácsoló konstrukció kisebb profilmélységet alakít ki, a magzóna által kitöltött anyaghányad pedig jobban ellenáll a mechanikai igénybevételeknek és az egymáson elcsúszó/gördülő felületek érintkezéséből és kopásából származó (tribológiai) kölcsönhatásoknak.

ÖSSZEFOGLALÁS, KÖVETKEZTETÉSEK

Jelen anyagban összefoglaltuk az esztergáláskor alkalmazott négyféle forgácsleválasztási változatot, külön kiemelve és részletezve a gyakorlatban előforduló két leggyakoribb módszert. Ezek nyomán az alábbi eredményekre jutottunk:

- számszerű vizsgálatokkal mutattuk ki az alkalmazott szerszám forgácsolásban részt vevő élszakaszának az állandó és a változó forgácsolási adatoktól való függését. Megállapítottuk, hogy az előtolás növekedése elhanyagolható mértékű változást okoz, viszont a fogásmélység és a lapka alakja (azaz élszögei) döntően befolyásolják a fogásban lévő aktív élhossz nagyságát. Két általános felhasználású („D” és „C” alakjelű) lapkák példáján keresztül elemeztük az egyenes élszakaszok és a rádiusz szerepét a leválasztási folyamatban;
- geometriailag modelleztük a szerszámok érdesség-előállító képességét, levezettük azokat a különbségeket, amelyek a szerszámcsúcson, illetve a mellékéllal történő esztergáláskor vannak az általunk célszerűen választott lapkák esetében;
- többszörösen ismételt, szisztematikus kísérletekkel határoztuk meg az elméleti összefüggések és egy korszerű műszerrel mért értékek alakulását. Feltártuk és célszerű modellekkel írtuk le 23-féle érdességi paraméter változásait a választott kétféle szerszám típussal esztergált felület esetében;
- részletesen tárgyaltuk a négyféle érdességi csoport jól mérhető paramétereit. A vizsgált szerszámok eltérő viselkedése kapcsán felhívtuk a figyelmet a topológiai térkép és a funkcionális érdességi jellemzők fontosságára;
- vizsgálataink alapján a „D” alakú lapka jól alkalmazható a kontúrmásolási feladatoknál, viszont a félsimító hossz- és keresztesztergáláskor a „C” jelű változat felhasználása minden szempontból jól indokolható.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Brammertz, P.H.: Die Ermittlung der Oberflächenrauigkeit beim Feindreihen 20. Forschungsbericht des Lab. für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre, Girardet, Essen, 1962
- [2] Kardos, Á. (1962) A mellékél elhelyezési szög hatása alumíniumötvözet esztergáláskor *Gép*, pp. 217-233.
- [3] Sokolowski, A.P.: Präzision in der Metallbearbeitung, VEB Verlag Technik, Berlin, 1955.
- [4] Makarov, A.D.: Optimizacija processzov rezanyija, Moszkva, 1976. p. 101.
- [5] Brewer, R.C.; Rueda, R. (1964) Die Ermittlung der wirtschaftlichen Arbeitsbedingungen beim Drehen, *Werkstattstechnik* 54:6
- [6] Gribovszki, L.: Gépipari megmunkálások, MK, Budapest, 1977.
- [7] Bus, C.; Touwen, A.L.; Veenstra, P.C.; Van der Wolf, A.L. (1971) On the Significance of Equivalent Chip Thickness. *Annals of the CIRP*, 44:121-124.
- [8] Box G.; Wilson K. (1951) On experimental attainment of optimum conditions *J. Royal Statist. Soc.*, 13(1):1-45.
- [9] Drégelyi-Kiss, Á: (2023) On the Optimization of Resistance Projection Welding Process, *Material And Mechanical Engineering Technology* 5(3):3-10
- [10] De Chiffre, L. (1999) Industrial survey on ISO surface texture parameters, *Annals of the CIRP*, 48(3):74-77
- [11] B. Griffiths: Manufacturing Surface Technology, Penton Press, London, 2001.
- [12] G.P. Petropoulos; N.M. Vaxevanidis; C.N. Pandazaras; A. Antoniadis (2006) Multi-parameter identification and control of turned surface textures *Int J Adv Manuf Technol* 29:118–128.
- [13] Sipos, S. (2019) Új érdességi számítóképletek esztergálásnál, Budapest, pp. 32
- [14] Sipos, S.; Palásti-Kovács, B.; Horváth, R. (2015) Forgácsolótechnológiák és szerszámok, Elektronikus jegyzet, ÓE 3057, Budapest
- [15] Sipos, S.; Rácz, V.: Esztergált felületek érdességi összefüggései Oktatási segédlet, ÓE/BGK, Budapest, 2021. pp. 38.
- [16] B. Palásti-K.; S. Sipos; Á. Czifra (2012) Interpretation of „Rz=4xRa” and other roughness parameters in the evaluation of machined surfaces. *Proceedings of the 13th International Conference on Tools, ICT-2012*, pp. 237-244.
- [17] J-E. Stáhl; F. Schultheiss; S. Hägglund (2011) Analytical and Experimental Determination of Ra Surface Roughness during Turning, *Procedia Engineering* 19:349-356
- [18] Horváth, R.; Sipos, S. (2011) Topológiai térképek alumíniumötvözet finomesztergálásához. *Óbuda University e-Bulletin* 2(1):355-363.
- [19] E.S. Gadelmawla et.al (2002): Roughness parameters. *J. of Mat.Proc.Techn.*, 123:133-145.
- [20] Szalóki, I.; Sipos, S.; Viharos Zs. (2016) Szintaktikus fémhabok marással megmunkált felületi struktúrájának elemzése. *Proceedings of 8th International Engineering Symposium at Bánki* Paper 50
- [21] 3 steps to Understanding Surface Texture, *Digital Metrology Solution*, May 26, 2014
- [22] R. Horváth; B. Palásti-Kovács; S. Sipos (2011) Optimal tool selection for environmental-friendly turning operation of aluminium *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, 39(2):257-263.
- [23] Sipos, S.; Rácz, V.: TaeguTec és ISCAR szimpózium, Budapest/Nagytarcsa, 2023/2024.
- [24] C.L. He; W.J. Zong; J.J. (2018) Zhang: Influencing factors and theoretical modeling methods of surface roughness in turning process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 129:15-26.
- [25] K. Zak; W. Grzesik; S. Brol (2009) Finish turning of nodular cast iron using different cutting tool inserts, *Archivum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, 29(4):21-32

Szabad formájú felületek marási körülményeinek javítása

Improving of milling condition of free-form surfaces

Mikó Balázs*, Varga Bálint*, Abdulwahab Mgherony*

* Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország

miko.balazs@bkg.uni-obuda.hu; varga.balint@bkg.uni-obuda.hu; abdulwahab.mgherony@uni-obuda.hu

Összefoglalás — Szabad formájú felületek gömbvégű maróval történő simítása esetén a forgácsolás körülményei a felület változása miatt folyamatosan változnak. Ez kihat a szerszám terhelésére, a gyártott felület érdességére és alakpontosságára. A cikk bemutatja a változó marási körülményekből adódó eltéréseket, valamint a folyamatos fordulatszám szabályozás módszerét, és az ezzel elérhető eredményeket.

Kulcsszavak: simító marás, gömbvégű maró, felületi érdesség, fordulatszám szabályozás

Abstract — When finishing free-form surfaces with ball-end milling cutters, the cutting circumstances are constantly changing as the surface changes. This affects the load on the tool, the roughness and the accuracy of the finished surface. The paper describes the variations due to changing milling conditions, as well as the method of continuous speed control and the results that can be achieved.

Keywords: finishing milling, ball-end milling, surface roughness, spindle speed control

1 BEVEZETÉS

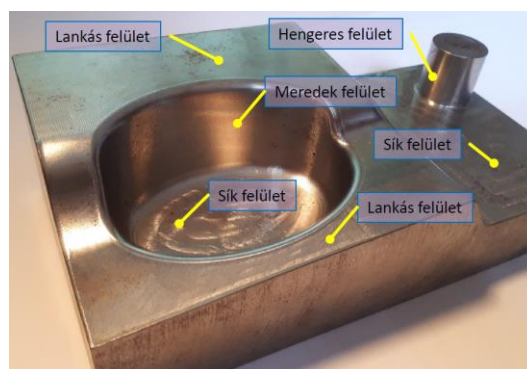
A szabad formájú felületek alapvető szerepet játszanak az olyan gépkatrészek esetében, ahol a kialakítást esztétikai vagy áramlási szempontok határozzák meg, mint például a karosszériaelemek és az utastér burkolati elemei, vagy a háztartási gépek burkolatai. Az ilyen alkatrészeket előállító alakító és öntőszerszámok tartalmazzák az alkatrész felületének negatív formáját, amelyet általában 3D vagy 5D marási technológiával dolgoznak fel. A makro- és mikro pontosság nagyon fontos a szabadformájú felület marásakor, mivel ezek a felületek általában az öntő- vagy formázószerszámok részét képezik, amelyek felületét az öntött, fröccsöntött vagy formázott felületre másolják. Ugyanakkor az öntő- és alakítószerszámok gyártása egyedi gyártás, a hatékony gyártás fontos szempont a jó felületi pontosság és a megfelelő felületi minőség mellett.

Bonyolult felületek marása esetén a CNC programot CAM rendszerrel generáljuk, mivel a szerszám-pálya-előállítás bonyolult számítást igényel. A CAM rendszerek számos marási stratégiát tartalmaznak, amelyek meghatározzák a műveletem típusát. A megmunkálás tervezése során a technológus mérnök (felhasználó) kiválasztja a stratégiát, beállítja a marószerszám adatait, a forgácsolási paramétereit, kiválasztja a megmunkálás területét. A CAM szimuláció segít a felület minőségének megjelenítésében.

A forgácsolási folyamatot több tényező határozza meg [1][2][3][4][5]:

- munkadarab anyagminősége (összetevők, keménység, szakító szilárdság, szövetszerkezet, stb.);
- a munkadarab geometriája (a geometria jellege);
- a szerszám tulajdonságai (anyag, bevonat, élgeometria, geometriai méretek, kopottsági állapot, stb.);
- forgácsolási paraméterek (forgácsolási sebesség, előtolás, fogásmélység);
- szerszám-pálya (a pálya jellege, előtolás iránya);
- szerszám-gép (munkatér mérete, merevség, vezérlés, stb.);
- készülék (helyzetmeghatározás módja, felépítés, merevség, stb.).

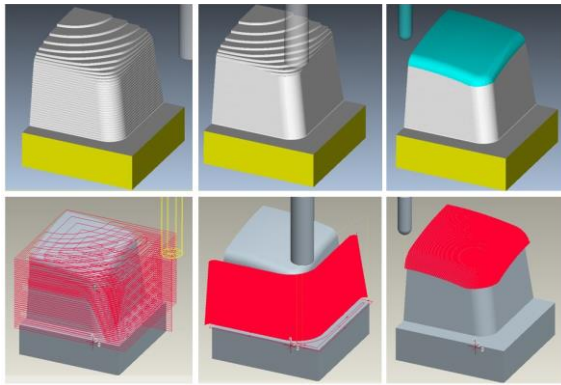
A különböző típusú felületek különböző megmunkálási stratégiákat igényelnek. Marás esetén a simítás megvalósítható 3D felület marással gömbvégű maróval lankás felület esetén, vagy teraszoló kontúrmarással újjmaróval vagy toroid (sarokrádiusz) maróval meredek felület esetén (1. ábra).



1. ábra: Többféle felületet tartalmazó teszt darab.

Szabad formájú felületek megmunkálása során a legfontosabb CAM stratégiák a térfogatmarás, a kontúrmarás és a 3D felületi marás (2. ábra). Általában a térfogat marás nagyoló, a kontúr és 3D felületmarás simító megmunkálás.

A kutatásunk célja szabad formájú felületek marási technológiáinak vizsgálata, a forgácsolási technológia (szerszám, forgácsolási paraméterek, szerszám-pálya) hatásának vizsgálata a felület mikro és makropontosságára.



2. ábra: Térfogat marás, kontúr marás és 3D felület marás.

Jelen cikkben lankás felületek gömbvégű maróval történő megmunkálásának kérdésével foglalkozunk. Egy-egy kísérleten keresztül mutatjuk be a marási körülményekben bekövetkező változások hatását a forgácsolási erőre, valamint a felület geometriai pontosságára, valamint a folyamatos főorsó fordulatszám szabályozás hatását a felületi érdességre.

2 ANYAGOK, ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

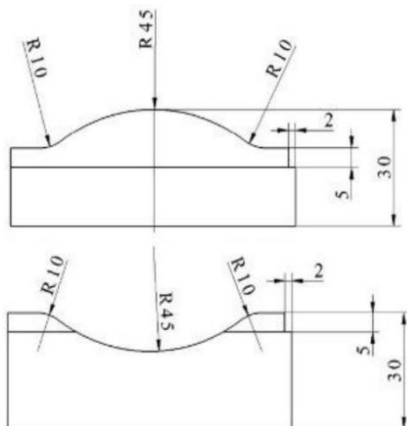
A kísérletek során kétféle alkatrész geometriát vizsgáltunk. Az első 80x80 mm méretű, homorú (konkáv - CV) és domború (konvex - CX) íves felületet tartalmazó, 42CrMo4 (1.7225; $R_m = 1000$ MPa) alacsony ötvöztetésű acélból készült (3. ábra).

A második teszt alkatrész 50x50 mm méretű, gömb ($R=106.25$ mm), sík és azokat összekötő tórusz ($R=25$ mm) felületet tartalmaz. Anyaga C45 (1.0503; $R_m=560$ MPa) közepes széntartalmú ötvöztelen acél (4. ábra).

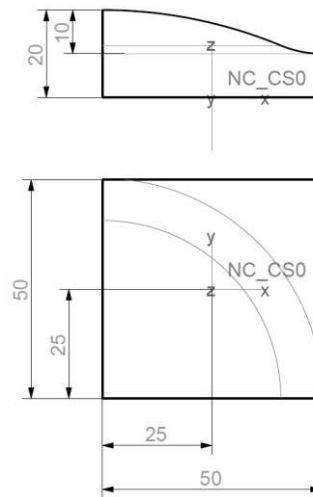
A marási kísérleteket egy Mazak 410-AII CNC vezérlésű megmunkáló központban végeztük, a szükséges NC programokat ProEngineer WF4 illetve CATIA v5 CAD/CAM rendszerrel állítottuk elő.

A felületi érdességet Mahr-Perten GD120 érdesség mérővel mértük. A geometriai hibáját Mitutoyo Crysta-Plus 544 típusú koordináta mérőgéppel mértük, a kiértékelés során Kotem Evolve SmartProfile szoftvert használtuk.

A forgácsolási erő mérése egy KISTLER 5019 3 komponensű erőmérő készülék segítségével történt. Az adatokat DynoWare szoftverrel értékeltük ki. Az erőméréseket 2000 Hz-es frekvencián végeztük.



3. ábra: Teszt alkatrész No.1



4. ábra: Teszt alkatrész No.2

Az erőmérési és geometriai pontosságot vizsgáló kísérlet során a következő paramétereket alkalmaztuk az 1. tesztalkatrész esetén. A felületek 10 mm átmérőjű (D_c), 4 élű (z) Fraisa X7450.450 tömör keménységű gömbvégű maróval lettek megmunkálva. A maró fordulatszáma $n=5100$ 1/min, ami $v_c=160$ m/min névleges forgácsolási sebességet jelent. A fogásmélység $a_p=0.3$ mm, amit elősimítással biztosítottunk. Az előtolás és a fogásmélység értékét 3-3 szinten változtattuk az 1. Táblázat szerint. A marás az y tengellyel párhuzamosan történt.

1. táblázat: Erőmérési kísérlet marási paraméterei

Tesztadarab	f_z [mm]	a_c [mm]
1	0.08	0.35
2	0.08	0.25
3	0.16	0.15
4	0.12	0.15
5	0.08	0.15
6	0.16	0.35

A felületi érdesség vizsgálat a következő paraméterekkel történt a 2. tesztalkatrész esetén. Az tesztalkatrészeket egy 10 mm átmérőjű (D_c) és 2 élű (z) YG G9F44100N tömör keménységű gömbvégű maróval munkáltuk meg.

A forgácsolási paraméterek a következők voltak: a névleges forgácsolási sebesség $v_c=63$ m/perc, a fogankénti előtolás $f_z=0.125$ mm. A forgácsolási paraméterek meghatározásánál figyelembe vettük a szerszámkatalógus ajánlását, a szerszám gép tulajdonságait és az orsó fordulatszám lehetséges változtatását, illetve maximális értékét. A fogásmélység $a_p=0.3$ mm és a fogás szélesség $a_c=0.25$ mm volt. A fogásmélység állandósága érdekében előmunkálást végeztünk gömbvégű marással.

A tesztfelületeket iránypárhuzamos, váltakozó irányú (zig-zag) 3D felületmarási módszerrel, az x tengelyhez viszonyítva öt különböző előtolási irányban munkáltuk meg. Az előtolási irányok $A_f = 0^\circ, 22^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ voltak.

Az első tesztcsoport esetében állandó orsófordulatszámot alkalmaztunk, az orsó fordulatszáma

$n=2000$ 1/min, az előtolási sebesség pedig $v_f=500$ mm/min volt. A második vizsgálati sorozat esetében az orsó fordulatszámát és az előtolási sebességet a szerszám pálya mentén módosítottuk, figyelembe véve a tényleges forgácsolási átmérőt. A fordulatszám módosítás eljárását a következő fejezet ismerteti részletesen.

3 FORDULATSZÁM SZABÁLYOZÁS MEGVALÓSÍTÁSA

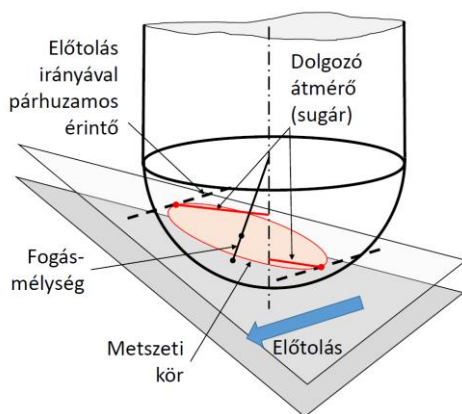
A gömbvégű szerszámmal végzett szabad formájú felületek marása az egyik leggyakrabban alkalmazott technológia a simítás során. Alapvetően a forgó marószerszám követi a felületet (előtolási sebesség, v_f), és a felület határán történő oldalirányú ellépés (a_p) után visszafordul. Ez a stratégia alkalmas elősimításra és nem alámetszett görbült felületek simítására CNC marógépen.

Gömbvégű maróval történő marás során a forgácsolás körülményei a felület változásával folyamatosan változnak. Az egyenletes forgácsleválasztás feltételei a felület és a szerszám változó helyzete miatt nem adóttak. Ennek hatása több tényezőt is megfigyelhető.

A forgácsolás során a szerszám helyzete és az előtolás irányának függvényében változik a forgács elméleti mérete és így a forgácsoló erő értéke. Ezzel párhuzamosan változik a szerszám forgácsoló (dolgozó) átmérője, ami az állandó főorsó fordulatszám miatt változó forgácsolási sebességet eredményez, ami kihatással van a kialakuló felület érdességére. Ennek következtében a változó felület érdessége inhomogén lesz. A szerszám dolgozó átmérőjének változása a szerszám döntésével kiküszöbölhető, ami azonban már 5D-s marási technológia alkalmazását jelenti.

A gömbvégű szerszám dolgozó átmérőjét a geometriai viszonyok elemzésével lehet meghatározni. Ennek során a következő tényezőket kell figyelembe venni:

- a szerszám névleges átmérője,
- a felület meredeksége,
- az előtolás iránya,
- a fogásmélység nagysága és a
- fogásszélesség iránya.



5. ábra: Gömbvégű maró dolgozó átmérője.

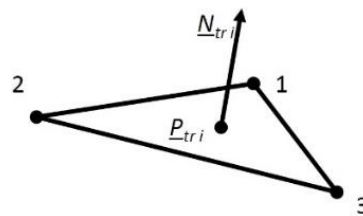
A szabad formájú felületet lokálisan síkkal helyettesítve a fogásmélységgel eltolt sík felület egy kört metsz ki a gömbvégű maró burkoló felületéből, melynek helyzete a felületi normális helyzetétől függ (5. ábra). A dolgozó átmérőt meghatározó pont ezen a körön lesz. A pont helyzete a szerszám előtolási irányától és a fogásvétel irányától függ, az előtolás irányú érintő jelöli ki. Az

aktuális dolgozó átmérőt e pont és a szerszám tengelyének távolság kétszerese adja. Ez alapján, amennyiben ismerjük ezen adatokat, a dolgozó átmérő minden egyes pontban kiszámolható [6].

A számítási algoritmus felhasználható egy meglévő CNC program módosítására, vagyis megvalósítható a dolgozó átmérő függvényében változó főorsó fordulatszám beállítása és így állandó forgácsoló sebesség biztosítása.

A CNC program tartalmazza a szerszám pálya pontjainak koordinátáit, illetve a forgácsolási paramétereket. A szerszám pálya CNC programban szereplő pontjai szabad formájú felület esetén általában nem egyeznek meg a felület pontjaival, de ez az alkalmazás szempontjából csak kis mértékű hibát eredményez. A megmunkálási program esetén az APT fájlformátumot választottuk, ami nem kötődik CNC vezérlőhöz és a CAM rendszerekben általánosan használt köztes fájlformátum, melyből a posztprocesszor a vezérlés orientált CNC programot előállítja. Így a módosított APT fájlt továbbra is posztprocesszálható. Az APT formátum ASCII kódolású, ami egyszerűsíti a feldolgozást és a módosítást is.

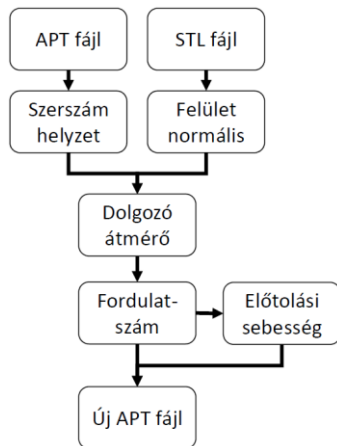
A felületi normális meghatározásához a megmunkálandó felület geometriai modelljére van szükségünk. A fejlesztés során az STL fájlformátumra esett a választásunk. Az STL formátumot gyors prototípus gyártási eljárásokhoz fejlesztették ki a felület leírásához. A felületeket háromszögekre bontja az algoritmus megadott megengedett hibával, a fájl a háromszögek csúcspontjainak koordinátáit, valamint a háromszög normálisának koordinátáit tartalmazza ASCII formában (6. ábra).



```
SOLID PRT0002
facet normal 0.000e+00 0.000e+00 -1.000e+00
outer loop
vertex 0.000e+00 5.000e+01 0.000e+00
vertex 5.000e+01 0.000e+00 0.000e+00
vertex 0.000e+00 0.000e+00 0.000e+00
endloop
endfacet
...
ENDSOLID PRT0002
```

6. ábra: STL fájlformátum

Az általunk fejlesztett algoritmus minden szerszám pálya ponthoz megkeresi a legközelebbi háromszöget a háromszög középpontja alapján és annak normálvektorát használja a számítás során. A forgácsolási sebességből és az aktuális dolgozó átmérőből a szükséges főorsó fordulatszám meghatározható, és ennek értékét a CNC programba az adott mondathoz hozzá írja az eljárás (7. ábra).



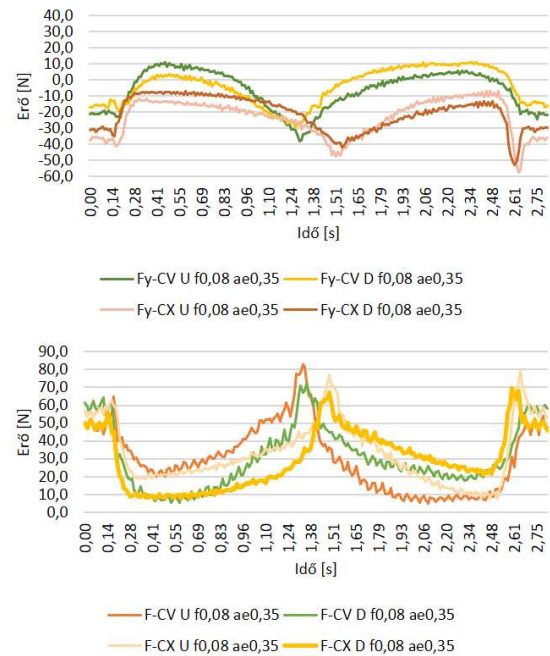
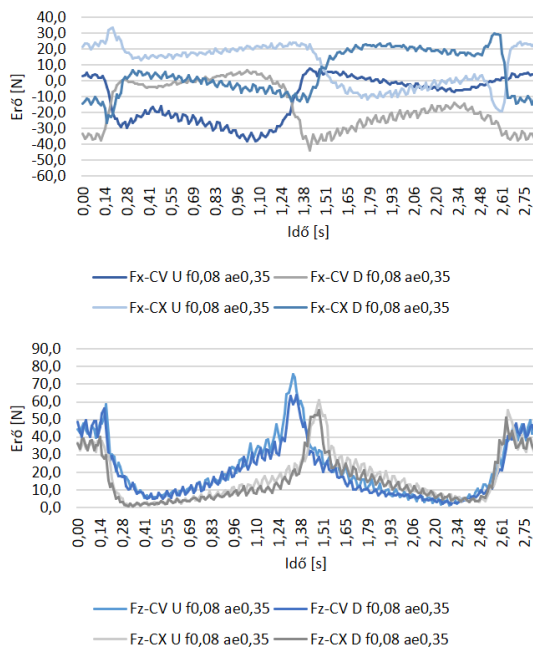
7. ábra: A fordulatszám szabályozás folyamatábrája.

4 EREDMÉNYEK

4.1 Forgácsolási erő változása

A marás során fellépő erők időbeni változását az 1 jelű beállítás esetén ($f_z=0.08$ mm; $a_e=0.35$ mm) ismertetjük. Az egyes erő összetevők jellege az összes beállítás esetén hasonló. A részletes elemzést [7] tartalmazza.

Mivel a forgácsolás y irányban történt, az F_x , x irányú erőkomponens a passzív erő, az F_y , y irányú komponens az előtolás irányú erő, az F_z , z irányú komponens a szerszám tengely irányú (axiális) erő. A három erőkomponens vektor összege a forgácsolási erő (F_c). A diagrammok egy szerszámút esetén mutatják az erők időbeni változását (8. ábra).

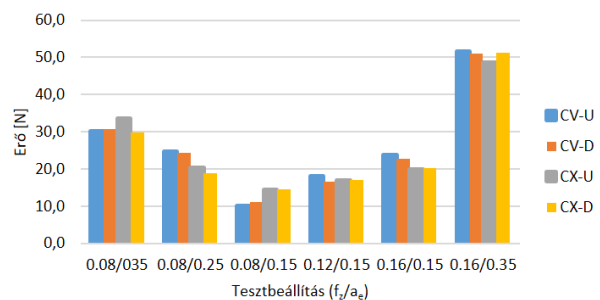


8. ábra: Forgácsoló erőkomponensek változása ($f_z=0.08$ mm; $a_e=0.35$ mm)

Mindegyik diagram esetén jól látható a felület változásának hatása. A felületek inflexiós pontjánál változik az erő jellege. A passzív erő (F_x) esetén változik az erő iránya, valamint az ellen- (U , $y+$ irányú előtolás) és egyenirányú (D , $y-$ irányú előtolás) marás esetén a diagramok közel szimmetrikusak. Az F_x erő bizonyos szakaszokon 0 érték körül ingadozik.

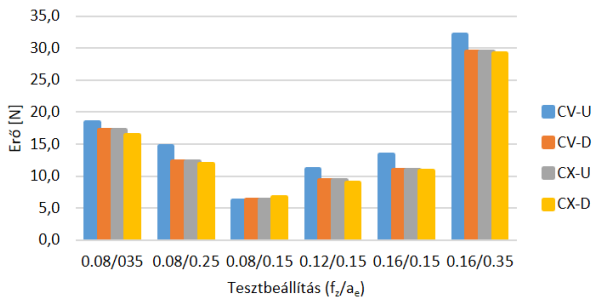
Az előtolás irányú erő (F_y) esetén az egyenes szakasznál van szélső értéke az erőnek, majd az inflexiós pont közelében szintén. Az axiális erők (F_z) esetén a jelleg hasonló, de a változás nagyobb mértékű. Mindhárom erőkomponens esetén a vízszintes részt elhagyva az erők gyors csökkenése figyelhető meg, majd az inflexiós ponthoz közeledve lassan növekszik az értékük. A homorú (CV) felület esetén a maximum az inflexiós pont előtt, a domború (CX) felület esetén kicsit utána van az erő maximum. Az eredő forgácsolási erő jellegét és nagyságát az axiális erő határozza meg.

Az eredő erők átlag értékeit a 9. ábra mutatja. Mint látható, az egyen- és ellenirányú marás, valamint a homorú és domború felület esetén a különbségek kismértékűek, az előtolás és a fogásszélesség nagyobb hatást gyakorol a forgácsolási erőre. A diagrammból az is látszik, hogy a fogásszélesség nagyobb hatással van az eredő erőre, mint az előtolás. A legnagyobb érték természetesen a vizsgált maximális paramétereknél van.



9. ábra: Átlagos forgácsolóerő

Egy pálya mentén az erő értékének változását a szórással jellemezhetjük. Mint a 10. ábra mutatja, követi az erő esetén tapasztalt tendenciákat. A szórás relatív értéke 43-62%, ami azt jelzi, hogy jelentősen változik az erő a szerszám pálya mentén.



10. ábra: A forgácsolóerő szórása

A marópálya mentén CAD modellezés segítségével meghatároztuk a forgács térfogatát és az elméleti átlagos vastagságát. Marás során, a szakaszos forgácsleválasztás, valamint a szerszám és a felület helyzetének változása miatt, a forgács vastagsága változik. Gömbvégű marás esetén ez két irányú változást jelent. CAD modellezéssel kiserkesztettük azt a térfogatot, melyet a szerszám burkoló térfogata, egy fogankénti előtolás távolság alatt kimetsz az elősimított darab térfogatából. Az elméleti forgácsvastagság ennek a kimetszett elem térfogatának és a forgácselem szerszámmal érintkező felületének a hányadosa [8].

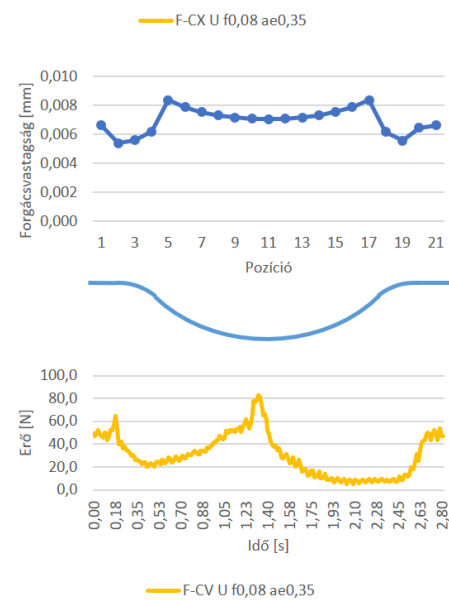
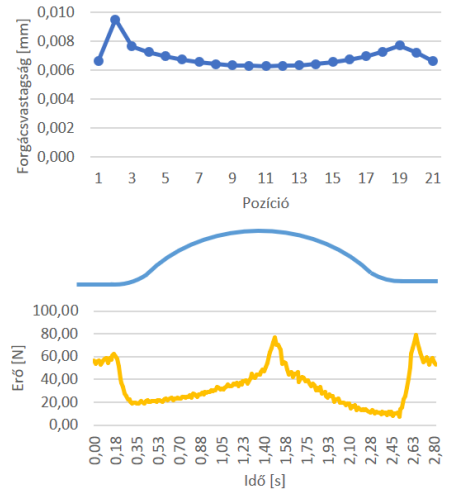
Az 1. beállítás esetén az értékeket a 11. ábra mutatja. A felület változását, a forgácsvastagság változását és a forgácsolóerő változását összevetve megállapítható, hogy az erő értékére nem csak a forgácsvastagság van hatással, mivel a felület középső szakaszán tapasztalt erőnövekedést nem indokolja a forgácsvastagság változása.

Az erő növekedését a forgácsolási viszonyokban történő változásokban kell keresni. A vízszinteshez közel álló felület szakaszokon a szerszám csúcsa (kereszt éle) is dolgozik. Azonban itt a kis átmérő miatt a forgácsolási sebesség 0 körüli, valamint az él kialakítása miatt a forgácsleválasztás korlátozott. Ebből következően a forgács leválasztása mellett megnő az alpanyag rugalmas és képlékeny deformációja, ami a szerszámmra ható erő növekedésében mutatkozik meg.

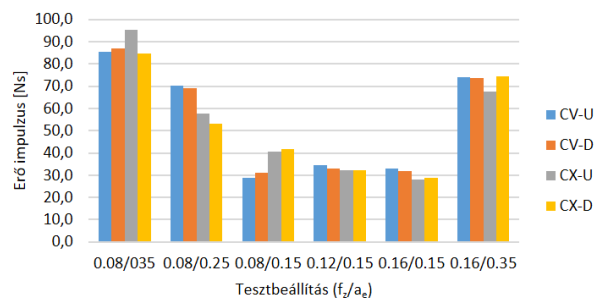
4.2 Erő impulzus

Az egyes beállítások esetén a megmunkálási idő eltér. Ennek hatását mutatja az erő impulzus, ami az erő-idő függvény alatti területe. Az erőimpulzus alkalmas eszköz a változó forgácsolási körülmények között mért erő értékek összehasonlítására.

Az erő impulzus értéke egyszerre veszi figyelembe az erő nagyságát, változását és a megmunkálás idejét. A 12. ábra 1-1 szerszám pálya esetén mutatja az értékeket. Az előtolás csökkentésével (1-2-5 beállítás) az érték csökken, majd a fogásszélesség növekedése (5-4-3 beállítás) okozta erőnövekedést a rövidebb marási idő kompenzálja. Az utolsó, maximális értékeket tartalmazó beállítás esetén (6) a nagy erő értékeket kompenzálja a nagyon rövid marási idő, így az erő impulzus értéke kisebb, mint az 1. beállítás esetén.

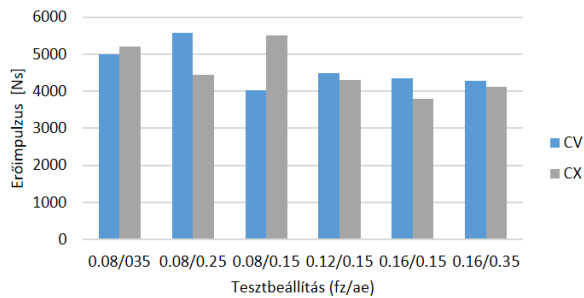


11. ábra: Forgácsvastagság és forgácsolóerő (CX-CV; $f_z=0.08$ mm; $a_e=0.35$ mm)

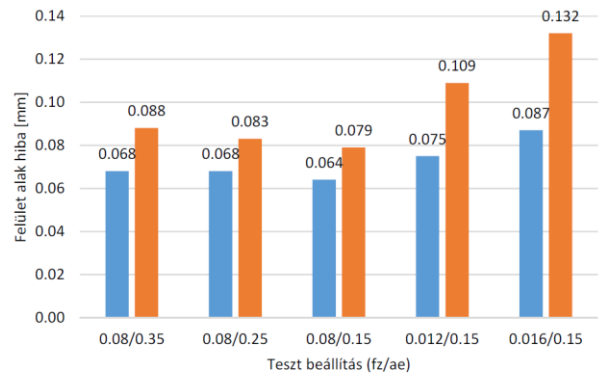


12. ábra: Erőimpulzus egy szerszám pálya esetén

A teljes felületre számolva az erő impulzus értékét az ellen- és egyenirányú pályaszakaszokat egyszerre kell figyelembe venni. Az értékek (13. ábra) az 1. beállítás esetén nagyobbak. A 2. és 5. beállítás esetén a konkáv és konvex felületre meghatározott értékek jelentősen eltérnek. Az 5-3-4-6. beállítások esetén lényegében azonos értékeket kapunk.



13. ábra: Erőimpulzus a felületen

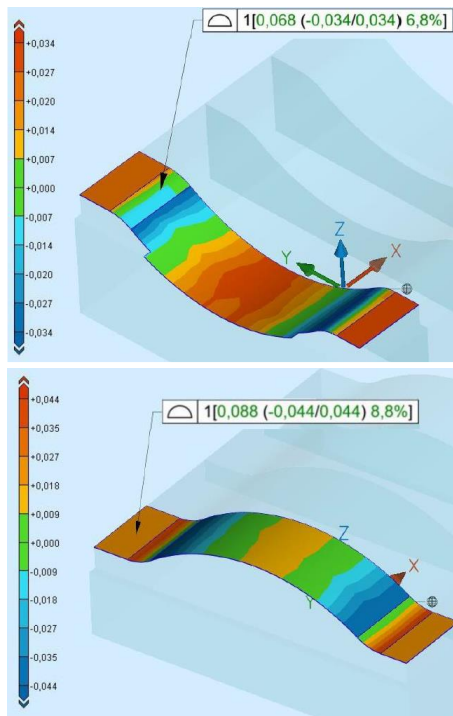


15. ábra: Felületi profilhiba

4.3 Alakhiba

A felület alak hiba egy sáv vastagságát jelenti, mely az elméleti felület szimmetrikus eltolásával jön létre és közrefogja a gyártott felületet.

A 14. ábra az 1. beállításhoz tartozó felületek esetén mutatja a felület alaktűréseken belüli eltéréseket. Ezek az eltérések jól követik a forgácsolási erő alakulását, a vízszintes kezdő és záró szakaszoknál, illetve a felület közepén, ahol az erő maximális értékét mértük (11. ábra). A felület eltérése ezeken a szakaszokon a legnagyobb pozitív irányba. Az átvezető rádiusznál, ahol az erő lecsökken, a felület nagy negatív eltérést mutat.



14. ábra: Felületi profilhiba térkép (CV-CX; $f_z=0.08$ mm; $a_c=0.35$ mm).

Az egyes felületek alakhibáját a 15. ábra mutatja, ezek értéke 0.06 mm és 0.14 mm közé esik. Mint látható a konvex felületek hibája nagyobb, annak ellenére, hogy az eredő erő átlagértékeiben nagy különbséget nem tapasztaltunk.

Míg az erők esetén a fogásszélesség mutat nagyobb hatást, a geometriai hiba az előtolás növelésével nőtt nagyobb mértékben.

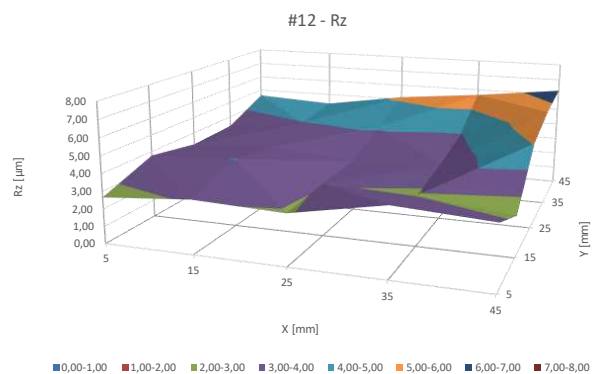
4.4 Felületi érdesség

A felületi érdesség változásának vizsgálata a 2 jelű tesztalkatrészen történt. A kutatás során az Rz érdességi paramétert paraméterét vizsgáltuk és hasonlítottuk össze.

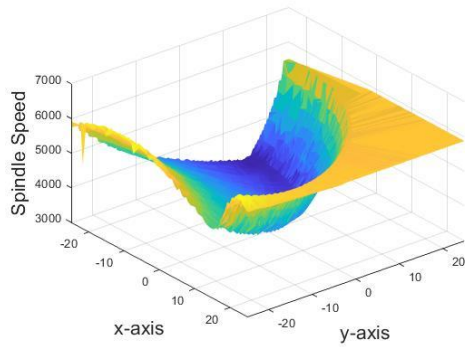
Az összes mért Rz adat (5 előtolási irány x 25 szakasz x 3 ismétlés) átlagértéke állandó főorsó fordulatszám esetén 4.1 μ m, a szórás pedig 1.3 μ m. Szabályozott (kompenzált) főorsó fordulatszám esetén az átlagérték 1.7 μ m, a szórás pedig 0.4 μ m. Az eredmények azt mutatják, hogy a szabályozott orsófordulatszám és az állandó fogankénti előtolás homogénebb felületi érdességet eredményez, az Rz átlagértéke kisebb és a szórás is kisebb. Ha a tényleges forgácsolási sebesség nem lenne hatással a felületi érdességre, akkor az Rz értékeknek 5 különböző előtolási irány esetén azonosnak kellene lenniük, amit a szórás kis értéke jelezne.

A 16. ábra a felületi érdességet mutatja az $A_f=22.5^\circ$ marási irány esetén. Az első diagram állandó főorsó orsófordulatszámú marási folyamat, a második állandó forgácsolási sebesség (szabályozott főorsó fordulatszám) esetén ábrázolja az érdességet. A 17. ábra a felület marás során alkalmazott főorsó fordulatszámot mutatja. Az eredmények részletes elemzését [9][10] tartalmazza.

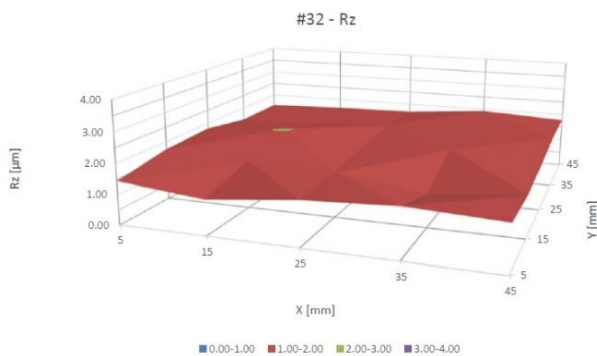
A diagramok alapján a felületi érdesség értékei szabályozott főorsó fordulatszám esetén kisebbek, és a felület mentén történő változás is minden esetben kisebb. A nagyobb felületi érdesség értékek a nem szabályozott marás esetén a vízszintes felületi szakaszokon található, ahol a megmunkálási átmérő és így a forgácsolási sebesség csökken. A szabályozott paraméterek esetén a felületi térkép simább, a különbségek kisebbek (18. ábra).



16. ábra: Felületi érdesség állandó főorsó fordulatszám mellett ($A_f=22.5^\circ$).



17. ábra: A fordulatszám kompenzált értékei $A_f=22.5^\circ$ marási irány esetén.



18. ábra: Felületi érdesség állandó forgácsolási sebesség mellett ($A_f=22.5^\circ$).

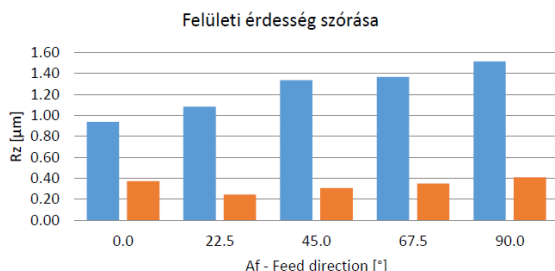
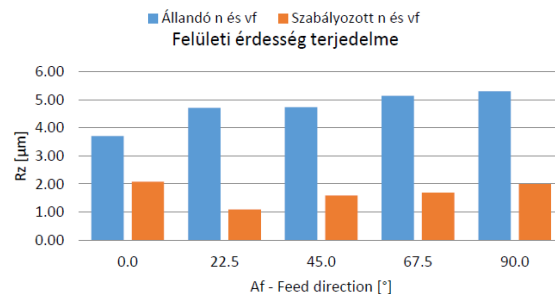
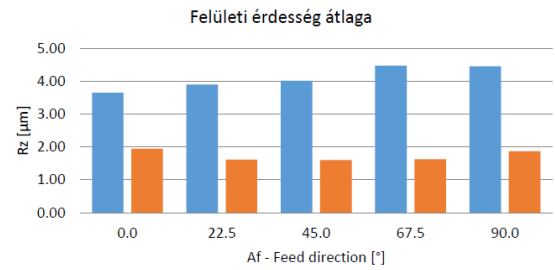
A felületi érdesség statisztikai adatainak összehasonlítása megerősíti a szabályozott orsófordulatszám hatását a felületi érdesség változására.

Az 19. ábra az Rz felületi érdesség átlagos értékeit hasonlítja össze az egyes marási irányok esetében. Állandó orsófordulatszám mellett marás során $4.5 \mu\text{m}$ ($A_f=67.5^\circ$) és $3.7 \mu\text{m}$ ($A_f=0^\circ$) között változnak az átlag értékek, míg a módosítás utáni Rz felületi érdesség értékek $2.0 \mu\text{m}$ ($A_f=0^\circ$) és $1.6 \mu\text{m}$ ($A_f=45^\circ$) között.

A forgácsolási sebesség állandó értéken tartása csökkenti a marási irány hatását a felület minőségére, ami hasonló felületi érdességet biztosíthat különböző marási irányok mellett, és homogénebb felületet biztosíthat a felületi dőléstől függetlenül.

Az Rz paraméter terjedelme (a maximális és a minimális értékek különbsége) $1 \mu\text{m}$ -tól körülbelül $2 \mu\text{m}$ -ig tart a szabályozott paraméterekkel mart felület esetében, a előtolási iránytól függően. Hagyományos marási módszerrel (állandó orsófordulatszám) a tartományok $3.7 \mu\text{m}$ és $5.3 \mu\text{m}$ között vannak mindkét irányban. A kisebb tartomány a homogénebb felületi minőséget jelzi.

A szabályozott paraméterekkel megmunkált munkadarabok szórása kisebb (kevesebb, mint $0.4 \mu\text{m}$), mint az optimalizálás nélkül megmunkáltaké, amelyek 1 és $1.5 \mu\text{m}$ között mozognak. A szórásnak ez a kis értéke azt jelenti, hogy a megmunkálás után a felület érdessége közel azonos a teljes felületen. Ez az eredmény különböző marási irányok mellett is azonos. A szórás hasonló értéke kiemeli azt, amit korábban megállapítottunk, hogy a javasolt módszerrel történő marás kiküszöbölheti a marási irány hatását.



19. ábra: Felületi érdesség adatai az öt marási irány függvényében állandó és szabályozott fordulatszám mellett.

5 KÖVETKEZTETÉSEK

A szabad formájú felületek gömbvégi marással történő megmunkálásakor a felület geometriai változásai miatt, a forgácsolás körülményei változnak. A szerszám-pálya létrehozásához CAM-rendszert szükséges használni, amely biztosítja a felület méret- és alakpontosságát, valamint a megfelelő felületi érdességet. A minőségi követelmények kombinációja csak a megfelelő mozgásstratégia, szerszámgeometria és marási paraméterek kiválasztásával lehetséges.

Kísérletek során vizsgáltuk a forgácsoló erő és a felületi érdesség változását, valamint szimuláció segítségével a forgács alakot és méretet.

Az ismertetett forgácsolási kísérletek alapján megállapítható, hogy

- (1) a forgácsolóerő a megmunkálási folyamat során nagymértékben változik;
- (2) a marási erő változását követi a mart felület geometriai pontossága;
- (3) az erőimpulzus hatékonyan használható a megmunkálási paraméterek által okozott erő- és megmunkálási időváltozások hatásának összehasonlítására;
- (4) az erő változását nemcsak a forgács keresztmetszetének változása határozza meg, hanem a szerszám ténylegesen megmunkáló élszakaszának körülményei is;

(5) amikor a szerszám csúcsa részt vesz a megmunkálásban (vízszinteshez közeli felületek), a forgácsolóerő jelentősen megnő, az alakeltéréssel egyetemben;

A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a gömbvégű szerszámmal történő szabad formájú felületek simító megmunkálásához olyan marási stratégiát kell választani, amelyben a szerszám csúcsa nem vesz részt a megmunkálásban a forgácsolóerő és az alakeltérés csökkentése érdekében.

Fontos következtetés, hogy a forgácsolóerő számításal történő meghatározásakor a forgácskeresztmetszet mellett a szerszám munkaszelvényének helyzetét is figyelembe kell venni, mivel ez is jelentősen befolyásolja a forgácsolóerőt.

Szabad formájú felület gömbvégű maróval történő megmunkálása során a változó dolgozó átmérő és forgácsolási sebesség a főorsó fordulatszámának kompenzálásával közel állandó értéken tartható. A bemutatott kompenzációs algoritmus a szerszám pályát leíró APT formájú fájl és a felületet leíró STL formátumú fájl adatai alapján folyamatosan módosítja a fordulatszám és az előtolási sebesség értékét az állandó marási körülmények fenntartása érdekében.

A kísérletek alapján a főbb következtetések a következők:

- (1) A marási tesztek a felületi érdesség javulását mutatják, amikor az alkatrészeket állandó forgácsolási sebességgel marjuk. A felületi érdesség átlagértéke és szórása csökkent.
- (2) Szabályozott orsófordulatszámmal történő marás esetén a felületi érdesség kevésbé függ a marási iránytól, amit a kisebb szórás is jelez.
- (3) A szabályozott orsófordulatszám alkalmazása nagyobb dinamikus igénybevételt jelent a szerszámgépre. Az orsó fordulatszám pálya szerinti integrálértéke jelzi az orsó dinamikus terhelését, amely alkalmas a leghatékonyabb marási irány kiválasztására.

A bemutatott módszer alkalmas a szabad alakú felület CNC maróprogramjának utófeldolgozására a forgácsolási sebesség kompenzálására, ami javítja a felület minőségét és vizuális megjelenését.

A módszer tovább finomítható, figyelembe véve a CNC megmunkálóközpont főhajtásának dinamikai tulajdonságát. Az algoritmus továbbfejlesztése során cél a fordulatszám változásának csökkentése a szerszám pálya módosításával. Így módon kombinálható a szerszám pálya tervezés és a dolgozó átmérő változásából adódó sebesség hatás kompenzálása.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki a kísérletek és mérések kivitelezésében nyújtott segítségért a Gyártástechnológiai Intézeti Tanszék két munkatársának, Ráczai Viktornak és Nagy Jánosnak.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Zebala W., Plaza M. (2014) Comparative study of 3- and 5-axis CNC centers for free-form machining of difficult-to-cut material. *Int. J. Production Economics.* 158:345-358; <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.08.006>
- [2] Sadílek M., Poruba Z., Cepová L., Šajgalík M. (2021) Increasing the Accuracy of Free-Form Surface Multi-axis Milling. *Materials.* 14(1):25; <https://doi.org/10.3390/ma14010025>

- [3] Mali R.A., Gupta T.K.V., Ramkumar J. (2021) A comprehensive review of free-form surface milling – Advances over a decade. *J. Manufacturing Processes.* 62:132-167; <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.014>
- [4] Sun Y. et.al (2021) Path, feedrate and trajectory planning for free-form 5 surface machining: A state-of-the-art review. *Chinese J. Aeronautics.* 35(8):12-29; <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.06.011>
- [5] Grešová Z., Izol P., Maňková I. Vrabel M. (2021) The effect of cutter path strategies on surface roughness when machining titanium alloy. *J. Production Engineering.* 24(2):9-12; <https://doi.org/10.24867/JPE-2021-02-009>
- [6] Mikó B., Zentay P. (2019) A geometric approach of working tool diameter in 3-axis ball-end milling. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology.* 104(1-4):1497-1507 <https://goi.org/10.1007/s00170-019-03968-9>
- [7] Varga B.; Mikó B. (2023) Investigation of the cutting force and surface profile error when free form milling. *Acta Technica Jaurinensis.* 16(1):27-33 <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00685>
- [8] Varga B.; Mikó B. (2022) CAD modelling of the chip shape in case of ball-end milling. *Mérnöki és Informatikai Megoldások/Engineering and IT Solutions* 3(2):30-38 <https://10.37775/EIS.2022.2.3>
- [9] Mgherony A.; Mikó B. (2023) Controlling the spindle speed when milling free-form surfaces using ball-end milling cutter. *Acta Polytechnica Hungarica* 20(6):135-149 <https://doi.org/10.12700/APH.20.6.2023.6.8>
- [10] Mgherony A.; Mikó B. (2023) The effect of the spindle speed control when milling free-form surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 130(3-4):1439-1449 <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12811-1>

„Mennyi az annyi ?” Fejezetek a mérés, a mérés technikájának a történetéből

„How much? So much”

Chapters from the history of measurement and measurement technique

Kis Ferenc

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország

kis.ferenc@bkg.uni-obuda.hu, kis591032@yahoo.com

Összefoglalás — A „mennyi” feltett kérdőszó végig kíséri az emberi történelmet a kezdetektől a napjainkig. Már az ősember felmérte az ejtett zsákmányt, valamiképp motoszkált benne, hogy vajon elég lesz-e az ejtett zsákmány, hisz nagy a család... Lassan elindult egy szükséglet, hogy a mennyit, vagyis a mennyi-séget felmérjük, megmérjük, hogy lássuk nagyságát, viszonylagosságát. De ez nem csak a materiális javakra vonatkozik, mert majd meg fog jelenni az idő érzete, majd fogalma, mely ma már a tudományágak legfontosabb alappillére.

Kulcsszavak: Bacon, csillagászat, Galilei, groma, homokóra, időmérés, inga, lencse, mérés, napóra, navigálás, Nonius, segédszála, súlymérés, szögmérés, távcső, térfogat mérés, terület mérés, toronyóra, Vernier, vízóra.

Abstract — The question word "how much" has accompanied human history from its beginnings to the present day. Already the caveman assessed the prey taken, somehow wondering if the captured prey would be enough, since the family is large... Slowly a need began to emerge to measure and measure how much, that is, to see its greatness and relativity. But this does not only apply to material goods, because the sense and concept of time will appear, which is now the most important pillar of the disciplines.

Keywords: Bacon, astronomy, groma, Galilei hourglass, timekeeping, pendulum, lens, measurement, sundial, navigation, Nonius, auxiliary scale, weighing, angle measurement, telescope, volume measurement, area measurement, tower

1 BEVEZETÉS

Ezen írás a hosszú idő óta folytatott technika- és tudománytörténeti kutakodásom egyik „terméke”, mely az évente megtartott Kutatók Éjszakája egyik előadásán alapul, egyben egyik mozaikja egy nagyobb lélegzetű, most készülő technika- és tudománytörténeti anyagomnak. Az eredeti anyag egyik célcsoportja a középiskolás korosztály, egyfajta kedvcsinálónak szántam a tudományok iránt. A nyelvezetében a viszonylagos egyszerűségekre törekszem. Terjedelmi okokból viszont a nagyon közismert dolgokat szűkebben tárgyalom.

©The author(s). Open access is under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial No Derivatives 4.0 International Licence.

Ugyancsak utalás szintjén szerepelnek az időhöz kapcsolódó szögmérési és skála-leolvasásos csillagászati műszerek.

2 ŐSKOR ÉS KORA ÓKOR

A csoportta szerveződés a csapatban végzett zsákmányszerzés eredményét az osztozkodás a kezdeti időkben vélhetően nem túl kulturált tevékenysége zárta. Az emberre válás legnagyobb korszaka, az őskorszak 2 millió éven át zajlott, számunkra nem is ez a korszak érdekes, hanem az ún. új-kőkorszak, amelynek kialakulását markánsan meghatározta a legutolsó jégkorszak „lecsengése”, az összefüggő jégtakarók visszavonulása, a klíma kedvezőbbé válása.

Az emberiség e korszakát neolitikumnak nevezzük, mely a vadászatot és gyűjtögetést felváltó növénytermesztés és háziállat-tartás megjelenésével jellemezhető.

A neolitikus kultúra i. e. 10 000 után jelent meg Észak-Ázsiában (nagyjából Irán mostani területe), és onnan terjedt kelet és nyugat felé. Korai neolitikus kultúra alakult ki Délkelet-Anatóliában, Szíria és Irak területén i. e. 8000 körül. Az első élelemtermelő közösségek Délkelet-Európában i. e. 7000 körül jelentek meg. A korai neolitikus állattenyésztés pár vadon élő és háziállat, juh és kecske tartására korlátozódott, de ahogy melegebbé vált az éghajlat i. e. 6000 körül, megjelent a szarvasmarha és a sertés, átmeneti vagy állandó települések alakultak ki.

A csoportos együttlét már bizonyos termelő technológiákat hozott magával (cserépedény készítés), a cserekereskedés hozadéka hamarosan a számlálás (számolás), rögzítés (később az írás), illetve amit nem tudunk megszámlálni, a megmérés, összevetés tevékenysége. [1]

3 MINDEN A SUMÉROKKAL KEZDŐDIK

A jégkorszak lecsengésének hozadéka, hogy viszonylag rövid idő alatt – néhány ezer év alatt – óriási területek

váltak mezőgazdasági művelésre alkalmassá (az ún. Termékeny Félhold), amelynek egyik része Mezopotámia.

Történetünkhöz szorosan hozzátartozik, hogy a neolitikus korszakban az emberek kis csoportokban, laza faluszerkezetben éltek, hiszen nem volt ok, hogy jobban tömörüljenek. Ez i.e. 3500 körül viszonylag hirtelen változás állt be. Az addig nedvesebb klíma jóval szárazabbá vált, a fellépő csapadékszegénység arra kényszerítette a viszonylag nagyobb embertömeget, hogy kialakítsák az öntözéses gazdálkodást, mely egyre terebélyesedő csatornarendszerrel volt megvalósítható. Egyre jelentősebb az összetelepülés, ezen települések mérete rohamosan nő. A csatornázás tulajdonképpen vízgazdálkodás, mely az *egyik első mérnöki tevékenység*. A csatornázások már szervezett, nagyobb területekre kiterjedő nagy szervezetségű államot igényelnek, vezetőirányítóval az élen.

Mezopotámia az ókor legjobban kutatott területe, a kutatásban a klasszikus régészet és a legmodernebb kutatási eszközök, technológiák vesznek részt. Ennek ellenére, a sumérok előtti kultúrákról keveset tudunk, bizonytalanok az információk.

Mezopotámiára jellemző egy óriási időbeli kontinuitás, mely 4000 évet is átfog. A korai városállamokat már birodalmak követték: a sumér, akkád, az ó-babiloni, asszír, új asszír, új-babiloni és utolsóként a perzsa. Az i.e. 3500 körül megjelentek itt hódítóként a sumérok, akik egy magasabb hierarchiájú, fejlettebb társadalmi berendezkedést hoztak magukkal, egy ugrásszerű fejlődést okozva. Magukról a sumérok eredetéről semmit nem tudunk, nyelvük egy más nyelvvel sem rokon. Hogy honnét jöttek, arra sincsenek még meggyőző bizonyítékok. De az biztos, hogy a régészeti leletek között megjelenik a fejlett (küllős) kerék, a használható vitorla, a MÉRLEG, az írás, a számolás a nagyon praktikus 60-as számrendszerrel. Az írásukról annyit tudni kell, hogy nagyrészt ékírás, amely már egyfajta kódolás, a képpírással (a hierografikus írással) ellentétben. Valamint témánk szempontjából: a súly és térfogatmérés, a hossz- és szög mérés, ezek hiteles (jelzett) mértéke.

A társadalom, a technológia és a mérés nagyon szorosan összefügg, mielőtt a sumérokkal foglalkozunk, más nagy ókori kultúrákra is vonatkozik, most összefoglaljuk:

Mérési tevékenységet igényel:

- társadalmi szempontból – az adók pontos beszolgáltatása és teljesítése,
- a kereskedelem, az egymással való elszámolhatóság szempontjából,
- a földterületek pontos meghatározása,
- a magas státusú épületek építése (templomok, várfalak, védőtornyok stb.),
- a különféle funkciójú csatornák, zsilipek építése,
- asztrológiai (csillagjósolás) és asztronómiai (csillagászati) mérések.

Ez utóbbi már két mérési fogalmat használt egyidejűleg, a szög és az idő fogalmát.

Az első írásos emlékek, melyeket agyagtáblák őriztek meg - (itt most ebben az esetben nagyon szerencsés egy-egy város valamilyen okokból, természetes tűzvész, vagy háborúk miatti) leégése, mert a napon szárított agyagtáblák kiégtek, így konzerválódtak - évezredek át fennmaradtak.

Így már fennmaradt az az akkád törvény is, i.e. 2150-ből, mely a korábbi (városközpontokonként eltérő) térfogat mértékegységeket egy szabványban egységesítette! (Nagyjából ugyanebben az időben Egyiptomban is a hiteles (jelzettel ellátott) etalont a palota főgondnoka őrizte. Mindkét birodalomban a törvény a legnagyobb szigorral sújtott le a súlymérték (és más mérték) hamisítóira.

Kr.e. 1800 elejétől és a következő 1200 évben folyamatosan a babilóniaiak a Nap mozgásán és a holdciklusokon alapuló naptár fejlesztésével voltak elfoglalva. A csillagászati mitológia nagy része a suméroktól öröklődött. A ma is használt csillagképeket, mint a Skorpió, Oroszlán, Nyilas, Bika, Auriga, Ikrek és Bak, a sumérok és a babilóniaiak jegyezték fel i.e. 2000 és i.e. 3000 között.

A babiloni csillagászok – aritmetika segítségével – pontosan kiszámították minden hónap pontos idejét és dátumát. Elméletileg az ókori babiloni szövegek dátumai átválthatók a naptárunkba. A babilóniaiak zseniálisak voltak a csillagászat terén, amit nagyon tiszteltek. Gondosan feljegyezték az égi eseményeket, abban a hitben, hogy alakíthatják a jövő eseményeit. Az ókori Mezopotámia legmonumentálisabb építészeti alkotásai a csillagászati megfigyelőhelyként is szolgáló lépcsős templomok, a zikkuratok voltak. Négyzetes alaprajzú teraszokból, valamint három, egymást derékszögben metsző és a felső szentélyhez vezető lépcsőből álltak. A legelső zikkuratok a Kr. e. 21. század körül épültek. Tisztán matematikai szövegek-számítások már az Ó-babilóni Birodalomból, a Kr. e. 1800-1600 közötti időszakból maradtak ránk. Hammurapi, a Törvényhozó vezetésével Kr.e. 1800-ban bolygópálya adatokat és csillagkatalógusokat állítottak össze a csillagász-papok. Ugyanebből a korból származik egy szögfüggvénytábla-töredék is, amelyet nemrég sikerült a Columbia egyetemen, több tudomány-ág (matematikától, az assziriológiáig) szakembereinek rekonstruálni. A százezres példányszámú agyagtáblának roppant kis százaléka tudományos jellegű, ez arra utal, hogy csak néhány nagy központban, igen kevesek művelhették az.

Szexagezimális (60-as alapú) helyiérték-számrendszert is alkalmaztak, ami leegyszerűsítette a nagyon nagy és nagyon kicsi számok rögzítésének feladatát. Az a gyakorlat, hogy egy kört 360 fokra, vagy egy órát 60 percre osztanak, a suméroktól kezdődött. Ez a nagyon praktikus 60-as számrendszer alkalmazása miatt van így. (a 60-nak nagyon sok osztója van, ami a matematikai műveleteket megkönnyíti, mivel csak egész és törtszámokat használtak).

Az addig nagyjából adott térséghez kötődő kultúrákat Nagy Sándor világhódítása forgatta fel az i.e. IV. században. Ugyan maga a tudás nem pusztult el, csak más központokba helyeződött át. Elsőre furcsának tűnik, hogy egy világhódító, idegenek számára zsarnok roppant művelt legyen, tele tudásszomjjal. Ugyan korának egyik legnagyobb lángelméje, Arisztotelész volt a mestere, de később önállóan is kereste a tudást a könyvekben. Nem célunk most Nagy Sándor tevékenységét elemezni, de általa lehetővé vált a keletről jövő, egyfajta tudásimport, mely inspiráló volt a görög kultúra fejlődésére [2-4].

4 INDIA

Az ókori Indiában nem beszélhetünk a mezopotámiaihoz hasonló történelmi kontinuitásról. Egyetlen nagybirodalom létezett, a harappai, i.e. 3000 és i.e.1800 között. Ezután az Indus völgye az erős klímaváltozás miatt lehanyatlott.

A harappaiak rendszerezett súly- és mértékrendszereket alkalmaztak. A jól megformált téglatesztúlyok szép számának elemzése arra utal, hogy az alacsonyabb címleteknél bináris rendszert – 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 –, a nagyobb súlyoknál pedig tizedes rendszert követtek. 160, 200, 320, 640, 1600, 3200, 6400, 8000 és 12800 arányokkal.

A sumer birodalmakkal való kereskedelmi kapcsolat jól kimutatható, ennek ellenére a kereskedelemben is használatos mértékrendszerek sajátjának tekinthetők, melyek a 10-es számrendszeren alapultak, nincs nyoma a sumerok 60-as rendszerének.

A hossz-mérettel kapcsolatos kiemelendő technikátörténeti érdekesség, hogy az i.e. 1650-ből származó (tíz-es felosztású) hossz-mérték 1, 6 mm-es távolságú osztásvonalainak pontosságát 0,12 mm-en belül van, hogy ezt 3500 évvel ezelőtt hogyan valósították meg, tudománytörténeti rejtély. Számos feltárt egyszerű földmérő műszer és mérőrudak meggyőző bizonyítékot szolgáltatottak a korai térképészeti tevékenységre [2-4].

5 EGYIPTOM

Az egyiptomi csillagászat kialakulásáról keveset tudunk. Míg Mezopotámiában írás rögzítésére szolgáló agyagtáblák tömegével megmaradtak, addig Egyiptomban az írás rögzítésére szolgáló papirusz tekercsekből sokszorta kevesebb maradt az utókorra. Az általunk jobban ismert és csodált fali „isten vésetek”, illetve festett hieroglifák a fáraókkal kapcsolatos eseményeket rögzítették, tetteiket dicsőítették, egyéb információt csak közvetve szolgáltatottak. Egyiptomi Birodalom történetében még sok a fehér folt, éppen ezért a most leírt, a Heidelbergi Egyetem vezetésével történt interdiszciplinális kutatás számos izgalmas kérdést világított meg.

Az egyiptomi fáraók XVIII–XX. dinasztiajában, az úgynevezett Újbirodalom fennállásának pontos idejét nem ismerjük. Hagyományosan az i. e. 1550 és 1070 közötti évekre teszik Egyiptom történetének ezt a legismertebb időszakát, a „klasszikus fáraók” korát. A régi időkben a mai Kairó közelében álló Memphis volt az ország közigazgatási központja, míg a mintegy 650 kilométerre fekvő Thébát csak a XVIII. dinasztia kezdetén jelölték ki ismét fővárosnak.

A XVIII. dinasztia egyik leghíresebb fáraója Ehnaton (IV. Amenhotep) volt. Uralkodásának pontos ideje sok vita tárgyát képezte. A számítás módjától (tudományterülettől) függően a fáraó uralkodásának kezdetét az i. e. 14. század közepére tették eltérő dátummal.

Egy friss kutatás szerint majdnem 30 évvel korábban léphetett trónra az ókori Egyiptom egyik legismertebb fáraója, a vallásreformter Ehnaton, mint eddig gondolták. Emil Khalisi (Heidelbergi Egyetem) számításait a fáraó

életében bekövetkezett három napfogyatkozás időpontjára alapozza.

A XVIII. dinasztia egyik leghíresebb fáraója Ehnaton (IV. Amenhotep) volt. Uralkodásának pontos ideje sok vita tárgyát képezte. A számítás módjától függően a fáraó uralkodásának kezdetét az i. e. 14. század közepére teszik. Nemrég megjelent tanulmányában Khalisi kísérletet tesz arra, hogy meghatározza az uralkodó beiktatásának pontos dátumát. Mindehhez az Ehnaton életében fennálló politikai helyzetet, a vallásreformot kiváltó körülményeket és a fáraó által látott napfogyatkozások időpontjait vette figyelembe.

Napfogyatkozás akkor következik be, amikor a Nap, a Hold és a Föld egy vonalba kerül. Feltűnő égi jelenség, főként akkor, amikor a Hold teljesen kitakarja a nála 400-szor nagyobb, de éppen 400-szor messzebb is lévő, így nagyjából ugyanakkora korongnak látszó Napot. Sajnos a teljes napfogyatkozás egy adott földrajzi helyen igen ritka, és csak egy keskeny sávban látható.

Az égbolt legfényesebb égiteste mind vallási, mind kulturális értelemben központi szerepet játszott az ősi Egyiptomban. Az egyiptomi civilizáció igazította elsőként a naptárát a Nap látszó égi mozgásához, szakítva a Hold járására naptárt építő babiloni és kínai hagyománnyal. Éppen ezért tűnik különösen meglepőnek, hogy az egyiptomi kultuszban oly fontos szerepet játszó égitest elsőtétedéséről nincsenek egyértelmű említések. A Nap hirtelen elsőtédedése pedig igencsak megrendítő esemény lehetett. Épp így észlelniük kellett a holdfogyatkozásokat is, de az ezekkel kapcsolatos aggodalmakról, felfordulásról nem találtak írásos említéseket, sem kísérletet a magyarázatukra.

Ennek egyik oka az egyiptomi kormányzati struktúrában rejlik. Csupán keveseknek adatott meg, hogy írni-olvasni tudjanak, és nekik nem volt szabad megörökíteniük azokat az eseményeket, amelyek nem illettek bele az istenként tisztelt fáraó rendszerébe. Így nem számoltak be semmilyen társadalmi feszültségről, zűrzavarról, vallási vitáról. Ha mégis, akkor szigorúan a részletek megemlézése nélkül. Ehnaton fáraó uralkodása hasonlóan nagy változásokat hozott az egyiptomi életbe.

Ehnaton valamikor 18 és 22 éves kora között került hatalomra. Uralkodásának ötödik (mások szerint harmadik) évében drasztikus változásokat vezetett be, amelyek során a Napot az összes többi isten fölé helyezte. Magát az isten egyetlen szolgájának nevezte, és Atonnak szentelte új fővárosát, Ahet-Aton is. Amellett, hogy a nevet is váltó fáraó fenekestül felforgatta a korábbi vallási kultúrát és a Napot tette meg a legfőbb istenségnek, olyasmit tett, ami *tudománytörténeti kuriozitás*: tudomással bírt egy 3 évvel később bekövetkező teljes napfogyatkozásról, annak pontos helyszínéről (ez csak nagyon szűk sávban látható a Földön tökéletesen, és igen ritkán van), és ott, a kietlen sivatagban új palotát építtetett [10]. Nem bizonyított, de erősen valószínű, hogy aki ezt meg tudta neki előre jósolni, annak tudása keletibbről származik, erre csak Babilóniában voltak képesek, illetve kínai csillagászok, de ez utóbbi elvethető. Az akkori egyiptomi csillagászat fejletlenek tekinthető, de vélhetően még nem jutott el erre a szintre. Minden esetre a fáraó, Ateh-Aton (Aton a Nap, Ateh az ő fia, görögösen Ehnaton) a teljes napfogyatkozás idején vonult be a palotába, foglalta el a trónját. Megjegyzésképp: itt a tudomány a politikát szolgálta, a fáraó visszaszerezte a

megrendült fáraói hatalmat a megerősödött főpapság felett, mivel főistenként fölébük helyezte magát [2, 3, 12].

5.1 Súlymérés Egyiptomban

(A cím mindjárt magyarázatra szorul. Mivel Newton tevékenységének megjelenéséig a gravitáció, mint fogalom nem létezett, így a tömegmérést sem lehetett elvonatkoztatni a gravitációs állandótól, a bizonyításához még kellett Cavendish és Coulomb torziós mérlege is.)

Az egyik első hiteles mérleg ábrázolás Egyiptomból, az i.e. 3. évezredből származik, a későbbi sírfeliratokon szinte mindig szerepel. Az ábrázolások egyik része valamilyen adóbeszolgáltatást ábrázol, de ennél is fontosabb szerepet kap a misztikában, Anubisz isten a halott szívét a mérleg serpenyőjébe tette, ha az túl könnyűnek találtatott, nem kerülhetett a túlvilágba. A mérést Thot, a bölcsesség és igazság írnokistene végezte. Ő jegyezte le a szívben található jót és rosszat [2-3].



1. ábra Vallási célú mérlegábrázolás

Mérlegeik kétkarú, felső forgáspontúak, a kiegyenlítés a teher oldalon, függesztett tolósúllyal történt. Kereskedelmi tevékenység esetén a mérlegelést emberi személy végezte, a közelben általában egy írnok tartózkodott.

6 KÍNA

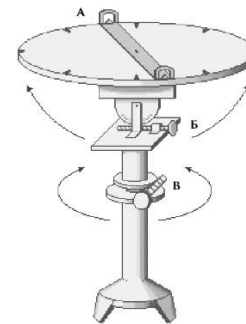
Az ókori Kína csillagászata és mérései rendkívül fejlettek voltak, és több ezeréves múltra tekintenek vissza. Az ókori kínaiak már i. e. 1300 körül azonosították a csillagokat, és a csontokon talált feliratok alapján a huszonnyolc csillagképet kategorizálták. A csillagászati megfigyelések részletes feljegyzése a Háborúk kora idején (i. e. 4. század) kezdődött.

A csillagászat egyik fő funkciója az időmérés volt. A kínaiak luniszoláris naptárt használtak, de mivel a Nap és a Hold ciklusai eltérőek, rendszeresen be kellett illeszteniük szökőhónapokat. Az időmérést egy kb. 8 kínai láb magas függőleges rúddal kezdték, amelynek árnyékának hosszát használták az idő meghatározására. Az i. sz. 132-ben, a Keleti Han-dinasztia idején fejlesztettek ki egy bonyolult vízóra alapú csillagászati órát, amely nappal és éjjel is képes volt az időt mutatni.

A távolságokat a kínaiak a hu (szekér) nevű, standard átmérőjű szekérkerék segítségével mérték, amelynek kerülete 360 egység hosszúságúnak felelt meg. A mérési módszer a kerék fordulatainak számolásán alapult, és a kerékkerület hosszával megszorozva kapták meg a teljes távolságot [2-3].

7 A GÖRÖGÖK ÉS A MÉRÉS

Az antik görög világban a tudományos (ezen csillagászatot kell érteni a kapcsolódó időméréssel) és a köznapi nevezhető mérések szintén szétváltak, az építészeti mérések az építészet szaktudománya volt, státuszuk, még ünnepektől szobrászok, építészek esetén is afféle szakmunkás, a filozófiai-elméleti kérdésekkel foglalkozó görög polgár mélyen lenézte a kétkézi munkát (még a művészeti jellegűt is). A köznapi mérések tradíciói nem változtak, viszont az. i.e. 191-120 között élő legnagyobb görög csillagász, egy korszerű műszert, a szögmérőket is tartalmazó dioptra-t használt, amely egy nagyságrenddel pontosabb mérési lehetőséget adott az ókori keleti vizsgálatokhoz képest.



2. ábra Dioptra

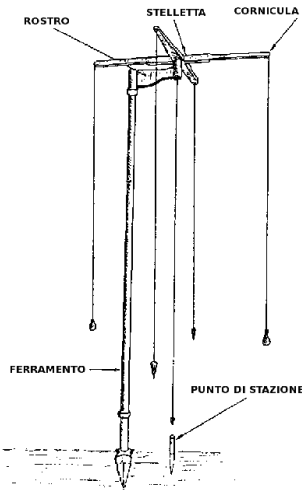
Ez az eszköz sokkal később - a teodolit elődjeként - a földmérésben is elterjedt, egy jóval egyszerűbb változatban a görögök is használták. (A római korban a használatáról nincs információ.) [2-3]

8 RÓMAI BIRODALOM

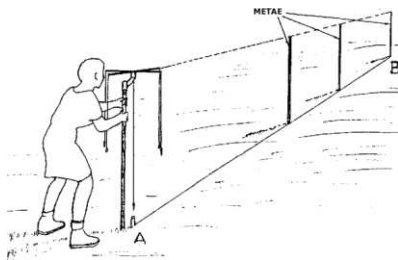
A Római Birodalom 1000 évét a természettudomány szempontjából a köznapi technológiai praktikum jellemezte (lásd pl. a római beton, vagy az utépítés fejlődését), a szórványos, görögök által végzett csillagászati megfigyelésektől eltekintve a társadalmat a természettudomány iránti teljes érdektelenség jellemezte. A méréseket zömében az ókori birodalmaktól illetve a görögöktől átvett mérőeszközök jellemezték (kivéve a szögmérő jellegű csillagászati eszközöket). A magasabb képzést a humán tudományok mellett az ún. „hadmérnökség” képviselte, mely magába foglalta az utépítést, illetve az aquaduktok építésének a tudományát, a katonai táborok építését. Egy merőben más szemlélet miatt hadmérnök egy igen magas rangú polgár, érdemes megemlíteni Sextus Julius Frontinus (i.sz. 40-103) nevét: mérnök, író, katona és első konzul-politikus is egyben (Nagy Britannia kormányzója, mellette a Birodalom aquaduktjainak főfelügyelője) Ő elvégezte a Róma aquaduktjainak széleskörű felmérését: beleértve a műszaki állapot, átfolyási sebességek-, átfolyási keresztmetszet-, lejtés-ellenőrzést. Kitért a szivárgásokra, de még a vízminőségre is. A földmérésről szóló terjedelmes könyve, mely olyanokra is, mint alapvető geometriai, matematikai ismeretek, feladatok megoldása, mérőeszköz használat és bőséges, földre vonatkozó jogszabály gyűjtemény.[8] A földmérés civil mesterség is volt,

bizonyára szép számmal voltak földmérők (geodéták), akik pl. a kiszolgált katonák, vagy betelepített lakosság kapta földek kimérését végezték, vagy osztozkodásban, nevüket (gromatikuszok) az eszközükről, a gromáról kapták.

A groma egy olyan földmérő eszköz, mely egy rúdon egymásra merőleges keresztpálcákból áll, a pálcák végén 1-1 nehezék függ. Igazából nem mérőeszköz, hanem segédeszköz egy egyenes és derékszög beállításához, amelynek hosszát általában mérőléccel, esetleg kötéllel mérik, az irányt felállított vékony rudakkal kijelölték. (A fennmaradt mérőléceket a hitelesítési jelölésükről lehet felismerni.)



3. ábra Groma



4. ábra Egyenes kiállítása gromával

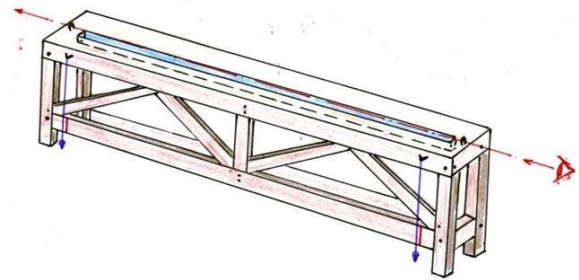
Gromával könnyedén meg lehetett mérni pl. a folyó túlsópartján lévő, elérhetetlen pont távolságát, de akár hajók távolságát is. Az eszközt minden ókori kultúrából ismerjük leírásból, viszont Pompeiben fennmaradt korabeli példány is.

Földméréssel foglalkozó tankönyv, vagy kézikönyv a Római Birodalomból számos van, némelyik 30-nál több témát is tartalmaz, tucatnyi írótól. (Külön kiemelném, hogy ezek – feldolgozás után újra kiadva – az 1600-as évekig használatban voltak...!)

Vitruvius, hadmérnök-építész tevékenysége a többkötetes, nagyterjedelmű munkájából ismert. Ez az egyetlen építészeti értekezés, amely az ókorból fennmaradt. Sajnos az eredeti példány elveszett, Nagy Károly udvarában lemásolták, ezek forogtak tudós-kézen. (A másolás során a rajzok nagy részét kihagyták, illetve elvesztett.) A reneszánsz újra felfedezettjeként a művét újra fogalmazták, a hiányzó rajzokat a szöveg alapján elkészítették, de ezek már a reneszánsz szellemét tükrözik. A mű nem csak építészettel foglalkozik, hanem mint

enciklopédia, kiter a cement és beton készítésétől, a vízórák építéséig, szerepelnek benne mérőeszközök, Archimedes vízemelő csavarja, geodéziai mérések és eszközei. A művéből ismerjük a hosszú időre feledésbe merült chorobates-t, a függőző vízmértéket, amely nélkülözhetetlen volt az akvaduktok építésénél.

A súlymérés az eszközt tekintve követte a mezopotámiai és egyiptomi hagyományokat, annyit megemlítve érdekességként, hogy a mérleges használt kiegyenlítő súlyok, sok esetben az épp uralkodó császár vagy befolyásos szenátor fejét ábrázolva nagyban megkönnyíti a mai régészek korszak-beazonosító tevékenységét. A mérleg jelentőségét mutatja, hogy mindegyik nagy civilizáció ismerte a Mérleg csillagképet, mely az egyetlen tárgyi csillagkép a többi élőlény (állat vagy mitológiai szereplő) mellett. A római korban a mérleg Justitia istennőhöz kapcsolódik, ki az igazságszolgáltatás, a jog tiszta alkalmazásának istennője, ő uralkodik az igazságosság betartásán. [2-3]



5. ábra vízmérték függőzővel (chorobates)

9 KÖZÉPKOR, SZERZETESEK, MÉRÉSEK

A középkort erőltetetten, vagy másképp nevezve egyezményesen a Római Birodalom bukásától, 476-tól számítjuk. Ez ugyan alkalmatlan az Európától távol eső kultúrák vizsgálatához, ott nem is igazán használjuk ezt a fogalmat. Ráadásul az évszám erősen a Appennin-félszigethez köthető. A Római Birodalom rohamos eróziója, szétesése, demoralizálódása a tudomány elillanását jelentette, Európában megszűnt az elit oktatása, a hozzáértők távolabbi birodalmakba szivárogtak el, pl. a fénykorát élő Bizánci Birodalomba, az akkor koptkeresztény (de vazallus) Egyiptomba, a Perzsa Birodalomba. A kultúra tovább vivője az egyház, de csak a szerzetesi rétege, Európa távoli zugaiban. Ez az időszak igen hosszú, vagy 500 év, majd Nagy Károly lesz, aki hódításai, birodalom-építése mellett a tudomány műveléséhez nélkülözhetetlen oktatási reformjával megindít egy pozitív irányba ható tendenciát. A királyi udvarban, majd később számos helyen létrejött iskolák megállították a hosszú idő óta folyó szellemi hanyatlást. Az általa elrendelt írásreform pedig olyan egységes és mindenki számára elsajátítható és elolvasható írást hozott létre, amely lehetővé tette a kommunikációt az egymástól távol fekvő vidékek írástudói között is. De ez önmagában kevés lenne, ha hathatós támogatásával nem indulna meg a megmaradt írások (kódexek, könyvek) összegyűjtése, szorgalmas másolása.

De még messze az idő, hogy mérést igénylő tudományok (pl. csillagászat, térképészet) megjelenjen

Európában, a legközelebbi Bizánci Birodalomban is, 529-ben Justinianus császár bezáratta az ún. Athéni iskolát, a Birodalom itt tömörülő tudósai kelet felé vették az irányt, főként a Perzsa Birodalomba.

A köznapi mérések is visszaszorultak, a súlymérés helyett inkább a térfogatmérés vagy a cserekereskedelem lett a jellemzőbb, a hossz mérésben a birodalmi egységek helyett megjelenik a lokalitás, az egy-egy király testméreteiről származtatott hosszúságok, melyet bonyolítanak a városok megjelenő saját mértékei. Szinte eltűnik az egységes hitelesség, mely az ókori nagybirodalmakat évszázadokon át jellemezte.

A rómaiakra jellemző precíz területmérés a legtöbb eszközével eltűnik, vele együtt a geometria is. Ha használnak is láncot a földmérésre, megjelennek olyan primitív fogalmak, mint a „x” kőhajításnyi hosszú földdarab.

Vagy 1200 évig (!) szünetel az útépités, eltűnik az ezzel foglalkozó „gromatikosz”, a földmérő-útépitő mérnök, a közel 80 ezer kilométeres római úthálózat lassan az enyészeté, a szakszerű karbantartás híján. Csak az 1555-ös angliai törvényesomag teszi kötelezővé az utak karbantartását, de ez nem több, mint előírások a javítgatásokra, esetleg hevenyészett utak létesítésére.

A térfogatmérés, talán helyesebb űrmérték mérésről beszélni, talán nem meglepő, de a történelem viharaiiban is viszonylag megőrizte szerepét, tekintve, hogy a sör-bor örök....

A szögmérés hosszú évszázadokra ismeretlen fogalom lesz (majd az arab hajósoktól „tanuljuk vissza”, de csak akkor, amikor az európai kereskedő a kizárólagos part menti hajózás után kimerészkedik a tengerre), a derékszög, valahonnét keletről származó sablonok formájában a legnagyobb építésmesterek féltve őrzött varázseszköze.

Eltűnik csillagászat híján a vízóra, a későbbi napórák leegyszerűsödnek, titkaik feledésbe merülnek, kizárólag időmutatásra szolgálnak, pl. felejtődik a napfordulók megállapításának módja. A mérések közül az egyház az időmérést karolja fel, teológiai okokból. A csillagászat is kapcsolatos mozgóünnep számítás (pl. húsvét) paptudósok gyakorolják. 540 körül Szent Benedek bevezeti (előírja) az ún. kolostori időszámítást. A napfelkelte a 0. óra, a napnyugta a 12. óra, a nap 12 részre lesz osztva. Természetesen az 1 egység hossza évszakoktól függően más és más (az órák télen rövidebbek, nyáron hosszabbak a változó napszak miatt).

605 körül Szabinusz pápa elrendeli, hogy a templomokra napórákat szereljenek fel, ezek a mai óráknak megfelelőek, számos templom tornya a kolostori napórát is tartalmazza, mely nem egyezik meg a „világi” napórával, mivel csak az imádkozások idejét jelölik. Mivel az egyszerű népnek még a napóra is nehézséget okoz, a misére hívás harangozással történik.

A középkor talán egyik első mérés-technikai újítása, a homokóra feltalálása (Chartesi Lipót udvara, 765 körül, de ez csak leírásból ismert). Első hiteles megjelenítés egy festményen, 1338-ból való. (Valójában a homokóra nem homokot tartalmaz, hanem más, erre a célra megfelelőbb anyagot (pl. mézskő port, vagy tojáskehéj port).) Ezzel megjelenik az órán belüli felosztás, a *percmérés*. Köznapi embert nem érdeklík az ilyen finom felosztások, a homokórát az ügyvédek, papok használják a tevékenységükhöz. Érdekes, hogy a keletebbre fekvő

kultúrákból homokóra alkalmazását nem ismerjük (a homok nem túl jó tulajdonságai miatt), víz-óra viszont mindenütt előfordult.



6. ábra Egyszerű, nem tudományos napóra

Éjszakai időmérésre Európában – a csillagászat megjelenéséig – nem volt igény, kivéve az egyház. Ismeretlen időpontban, a kolostorokban megjelenik a gyertya óra, hogy az éjszakai imádkozások (pl. éjjel kb. 2 óra) kezdőpontját megállapíthassák. Ezt egy virrasztó barát figyelte. Ez nem igazán nevezhető időmérésnek a durva pontatlansága miatt. Gazdagabb apátságokban megjelent a skálabeosztásos üveg időmérő méceses, amely a gazdagabb díszítettsége ellenére sem volt pontosabb.



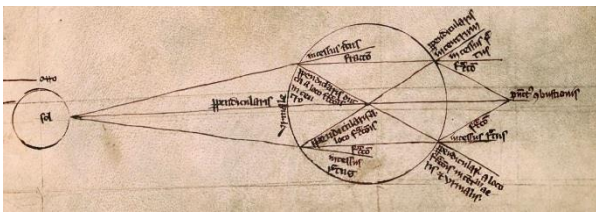
7. ábra Kolostori gyertya óra

9.1 A középkori tudományos mérés csirái

A tudományos mérés európai történetéhez Robert Grosseteste-ig kell visszanyúlnunk (kb. 1168–1253), Lincoln püspöke 1235 és 1253 között, a tizenharmadik századi angol szellemi élet egyik legkiemelkedőbb és legfigyelemreméltóbb alakja volt. Nagytehetségű ember: Arisztotelész és görög patrisztikus gondolkodók kommentátora és fordítója, filozófus, teológus és természetkutató. Nagy hatással volt rá Agoston, akinek gondolatai áthatják írásait, és akiből neoplatonikus szemléletet merített, de ő volt az egyik első, aki széles körben használta Arisztotelész, Avicenna és Averroes gondolatait. Rendkívül eredeti és fantáziadús leírást dolgozott ki a fizikai világ létrejöttéről és alapvető természetéről a fény hatása szempontjából, és számos rövid művet írt az optikáról és más természeti jelenségekről, valamint filozófiai és teológiai műveket.

Hatalmas benyomást tett kortársaira és későbbi oxfordi gondolkodókra, és a XIV. századi oxfordi tudományos fejlemények inspirálójaként emlegették. Legismertebb

követőjének neve számunkra már sokkal ismertebb, nem más, mint Roger Bacon, ifjú oxfordi egyetemistaként a tudományos empirizmus híve lett. Bár a saját ferences rendjének befolyásos tagjai, mindent megtettek azért, hogy modern nézeteinek hirdetését megakadályozták, IV. Kelemen pápa nem vált ellenségévé, sőt védelmébe vette, de titoktartást követelt tőle (nem hirdethette nézeteit), a pápa halálával az új pápa trónra lépésével őrizetbe vagy börtönbe vették. Újra fordította a fordítási hibák miatt rosszul értelmezett Arisztotelészt, megtanult jól arabul (ez akkoriban elég gyanús dolog volt), a legnagyobb arab tudósok műveit olvasta eredetiben. Ő általa került át Európába az arabok optikai tudása, ideértve az optikai lencsét is. (Megjegyzésként: A görögök ismerték a tükröket, viszont a lencsét nem.) Ő volt az első, aki a lencsékkel kísérleteket és méréseket végzett és csillagászati megfigyelésekhez is használta.



8. ábra Bacon mérés alapú tanulmánya a fénytörésről egy gömb alakú víztartályban

Az arabok ezt már a 9. század óta ismerték, i.u. 1000 körül már meg is jelentek egyes kolostorokban a velencei készítésű „olvasókövek”, amelyeket a szövegre helyezve használtak. Az arabok tudása átkerült a velenceiek világkereskedelme révén Európába. Bár Abbas Ibn Firnas a 9. században nagyon tiszta üveget elő tudott állítani, de ez a titok valószínű elveszhetett, mert Velencében újra fel kellett találni. Addig szemészeti célra természetes tiszta kvarc vagy berill kristály lencsét használtak. A tiszta üveg feltalálása lehetővé tette, hogy a szemészeti lencse ne csak a nagyon gazdagok privilégiuma legyen.

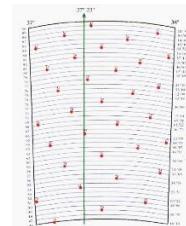
A nagyító lencsét azért is fontos megemlíteni, mert ez az eszköz tágította ki a tudomány, a mi esetünkben a vizsgálódás, a mérés lehetőségeit, mind a mikrovilág, mind a makrokozmosz felé, de ez még odébb van, a tudományt gúzsba kötötte az egyház skolasztikája, amelyben egyetlen megengedett volt, az isteni világi rend igazolása.

A tudományos tudást Európában Cordoba a XIII. századig, a Cordobai Kalifátus óriási könyvtára és az itt dolgozó tudósok révén. Al-Khazini mérleg számítása és szerkesztései később sokáig használták, Alhazen (965-1040) optikai könyve szerint tanulunk az alapfokú-középfokú oktatásban.

Visszatérve a köznapi mérésekhez a tömeggyártás megjelenéséig nem volt igény precíz geometriai méret meghatározó mérőeszközökre. Megelégedtek a különféle alakú és funkciójú sablonok, „etalonok”, mester-darabok használatával. [2, 5]

10 KITÁGUL A VILÁG – AZ ÚJKOR HAJNALA

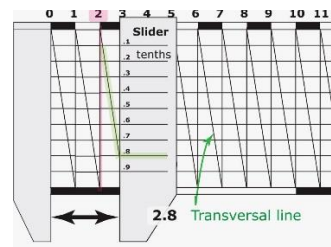
Az 1400-as évek eleje egy újabb fordulópontra Európában a tudomány-történetének egén. Ez egy ismert névhez köthető, aki nem más, mint Tengerész Henrik, amatőr csillagász, lelkes térkép-rajongó, új királyság alapítói ambíciókkal. Tervei alapján rajzottak szét a portugál felfedező hajók, megjelentek a csillagászati kézi műszerek a hajó-pozíció mérésben (A sextáns még nem, az majd jó 250 évvel később.). A portugálok alkalmassá teszik az iránytűt a hullámzó tengeren való használatra. Tengerész Henrik bevezeti a kötelező hajónapló készítést, a mérési eredmények rögzítésével. A hajónapló titkos, az út végeztével le kellett adni és elzárva őrizték. A század végén (az olasz reneszánsz kora), 1492-ben elindul Kolumbusz is, új kor kezdődik, a történelmi újkor.



9. ábra Nunes segédszkalájának szögmérő eszközről levett rajza

A köznapi élethez közelálló terület, a hajó-navigálás, illetve a Mercator nevével fémjelzett tudományos térképészet nagyobb pontosságot igényelt, ehhez fejlesztette ki Petrus Nonius (Pedro Nunes) portugál navigátor és matematikus, egyetemi tudós a segédvonalas nóniuszát mely meglehetősen nehezen kezelhető volt.

Bonyolultsága miatt más matematikusok ezt átdolgozták, ez a közelmúltig használatos volt.



10. ábra. Átdolgozott Nunes-skála illetve Brahe csillagászati eszközén

Ma már a Vernier által kifejlesztett segédszkalás megoldást (1631) alkalmazzuk a hossz- és szögmérő eszközöknél. A két tudós neve annyira összeforr, hogy kiírhatatlanul nóniusznak nevezzük Vernier megoldását, bár matematikailag van közös elv bennük. (Az interpoláció Vernier-elvét az elektronikus mérőrendszer részeként is használják az elektronikus elmozdulás érzékelőkben, mint például az abszolút kódolókhöz, amelyek lineáris vagy forgó mozgást mérnek. Nunes megoldása az újabb generációjú interferométerekben kap szerepet.)

A tudományos méréseknek nagy lökést adott eme két matematikai-méréstechnikai találmány, Tycho Brahe, a kor csillagászat-óriása, a nóniusz segítségével brutálisan meg tudta növelni mérési pontosságát, amelyre majd alapozva, a másik nagy óriás, a kor tudományos

forradalmának egyik kulcsszereplője, Johannes Kepler meg tudja állapítani a mindenki által ismert törvényeit.

Anyagomat Galileivel zárom, de csak pár sorban. Tevékenysége egy bővebb ismertetést érdemel, mely nem fér be e cikk keretei közé, de a folytatásban övé lesz a nyitószerp.

Galileo Galilei (1564-1642) olasz matematikus, fizikus, csillagász és természetfilozófus. Megalkotott egy kiváló távcsövet, amellyel új megfigyeléseket tett az égbolton: a Hold felszínén hegyek találhatók, hogy a Jupiternek négy holdja van, a Nap napfoltjai alapos megfigyelése után megállapította, hogy ez egy forgó gömb. Így a korábbi szögmeréses pozíciómérést felváltotta, illetve kiegészítette a közvetlen megfigyelés.

A csillagászat mellett Galilei sok más tudományos kísérletet is végzett hosszú élete során. Réges-régi elméleteket ellenőrzött, és aprólékos kísérletezés után újakat kidolgozott ki egy saját módszertan alapján, ezek már matematikailag is tervezett kísérletek, a korábbi, általánosan használt véletlenszerű kísérletezések után.

Elsőként írta le az ingát matematikailag, tervezett egy ingaszerkezetet is, de öregkori vaksága miatt nem tudta kivitelezni, fogsága, majd halála miatt ismeretlen maradt. [9] [11] Korábbi tanítványai, Cassini, Viviani mérnök-tudósok mentek tovább az általa megkezdett úton, Huygens, a Newtonnal egyenrangú mérnök-tudós megalkotja az ingaórát (illetve rugós időmérőket), megjelenik a másodperc pontos mérése számos tudományágban, a robbanásszerű alapkutatási és mérnöki tevékenységek nyílták és publikáltak.....megindult a tudományos forradalom. [2]



11. ábra Galilei féle leírás alapján elkészített középkori ingamodell replikája

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] John M. Roberts: A történelem előtt a korai civilizációk; 1999.; Officina Nova
- [2] John D. Bernal prof.: Science in History (Tudomány és történelem, Gondolat kiadó, 1963)
- [3] Otto Neugebauer: Egzakt tudományok az ókorban; 1984.; Gondolat Kiadó
- [4] Michael Roaf: A Mezopotámiai világ atlasza; 1998.; Helikon Kiadó- Magyar Könyvklub
- [5] Teres Ágoston: Biblia és asztronómia; 1999.; Springer Orvosi Kiadó

- [6] Joachim Herrmann: SH atlasz Csillagászat; 1994.; Springer Hungarica Kiadó
- [7] A Meteor 2002/7-8. számában megjelent cikk másodközlése.
- [8] „De aquaeductu urbis Romae” (Cambridge University Press , 2004)
- [9] David Wootton prof.: Az egek kémlelője - Galileo Galilei élete (Yale University Press/General Press Kiadó, 2014)
- [10] Khalisi, E. (2020). The solar eclipses of the pharaoh Akhenaten. *arXiv preprint arXiv:2004.12952*.
- [11] <https://plato.stanford.edu/archives/sum2020/entries/galileo/>
- [12] Magli, G. (2023). Satellite-Aided Analysis of the Position of the Sun Temples and the Dynastic History of the Vth Egyptian Dynasty. *Heritage*, 6(11), 7156-7169.

Sok minden a TTP-ről, Touch-Trigger Probe Piezo+

All about TTP, Touch-Trigger Probe Piezo+

Pálinkás Tibor gépészmérnök
Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország
tpalinkas@radiovilag.hu

Összefoglalás — A koordináta-mérőgépekhez kifejlesztett érintkezős finomtapintó, a Touch Trigger Probe (a továbbiakban: TTP), sir David Roberts McMurtry ír mérnök hatalmas karriert befutott találmánya, ma már nem csak a gépesített ipari méretellenőrzés és modern CNC gépek szerszámbeállításának nélkülözhetetlen segédeszköze, hanem az amatőr CNC-gép építők körében is népszerű. Mi sem bizonyítja ezt jobban, mint az a számos száj, amelyben egy-egy házilag kivitelezett, különböző színvonalú konstrukciót – a fából összetákolttól a félprofi kivitelűig – mutat be az alkotója. A következőkben ennek a tapintófejnek a problémáiról, a problémák néhány gyári megoldási módját ismertetjük, majd egy házilag megvalósított továbbfejlesztéséről esik szó. Jelen cikkünk eredetije a Rádiótechnika Évkönyvének 2017-es kiadásában jelent meg, ahol részletesebb építési útmutatók is szerepelnek.

Kulcsszavak: tapintófej, koordináta méréstechnika

Abstract — The Touch Trigger Probe (TTP) developed for coordinate measuring machines, a career-making invention by Irish engineer Sir David Roberts McMurtry is now an indispensable tool not only for industrial automated dimensional inspection and tool setting on modern CNC machines, but also for amateur CNC machine builders. Nothing proves this better than the many sites in which its creator presents a home-made construction of varying quality, from the wooden to the semi-professional. In the following, the problems of this probing head are described, some factory solutions to the problems are described, and then a home-made improvement is discussed. The original of this article was published in the 2017 edition of the Rádiótechnika Évkönyve, where more detailed construction instructions are included.

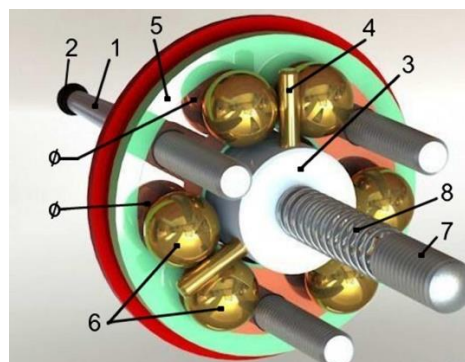
Keywords: touching probe, coordinate measurement

1 BEVEZETÉS, A HAGYOMÁNYOS TTP-ELV

McMurtry (1. ábra) eredeti szabadalmának egy egyedi megvalósítást bemutató szép grafikai illusztrációjának (2. ábra) eredetije az [1] honlapról származik. Mivel lehet, hogy nem mindenkinek ismerős, röviden bemutatjuk ezt a zseniálisan egyszerű tapintórendszert.



1. ábra: Sir David Roberts McMurtry



2. ábra: Szabadalom vázlatja

A konkrét feladat: a mérőgép (más esetekben CNC szerszámgép) szánjainak pozícióját abban a pillanatban kell beolvasni, amikor az 1 mérőszár végén levő, nagy alakhűségű 2 műrubin vagy kerámia tapintógömb megérinti a munkadarab (szerszám) kiszemelt pontját. Ehhez a tapintófejnek státuszjelet kell adnia a három (X, Y, Z) digitális mérőlécezt leolvasó elektronikus egység számára, hogy mentse el a pillanatnyi koordinátaértékeket. Ezt a státuszjelet egy nyugalmi állapotban zárt áramkör megszakítása jelenti. A tapintószár a 3 fémtömbbe ágyazott szigetelt hüvelyben van (általában) cserélhetően rögzítve. A tömbbe sugárirányban, 120°-os szögosztással 3 db kemény felületű 4 wolfrámgörgőt ragasztottak, melyek közül legalább egy a tömbtől el van szigetelve (l.: 6.1. pont). Az ábráról hiányzó tapintóház belsejében, ahhoz szilárdan rögzítve foglal helyet az 5 szigetelőgyűrű, amelybe szintén 120°-os osztással 6 nagy tisztaságú wolfrám golyópárokat ágyaztak. Mind a görgők, mind a golyók nagy geometriai pontossággal készültek. A 3-4 szerelvényt a 7 állítócsavarral beállítható nyomóerejű 8 rugó szorítja a golyók közé úgy, hogy a görgők összesen hat pontban érintkeznek azokkal. Ez hat villamos kontaktuspárt jelent, miközben a tömb – ezzel a tapintógömb – térbeli helyzete rendkívül szabatosan, nagy visszaállási pontossággal definiált (a hat igen korrekt

felfekvési pont a tapintógömb mind a hat szabadságfokát elveszi). A golyók kis vezetékdarabokkal össze vannak kötve úgy, hogy a golyópárokat rövidre záró görgőkkel együtt egy hat bontókontaktusból álló soros hálózatot alkossanak. Amennyiben a tapintógömböt bármely irányból, a tengelyirányú húzást kivéve, akár csak 1 μ -nél kisebb mértékben is elmozdítjuk, valamelyik görgő kiemelkedik a golyók közül, és az áramkör megszakad. Villamos szempontból tehát egy nyugvóáramú kapcsolóról van szó, ami az érintés pillanatában megszakítja azt az áramkört, amibe beiktatták.

Magának az eredeti szabadalomnak nem sikerült nyomára akadnom, de a neten az *US 4153998 A* számú, 1979-ben közzé tett szabadalmi leírás megtalálható ([2]); ez lényegében ugyanezt tartalmazza. (A következőkben számos szabadalmi leírásra hivatkozom, ezek mindegyikét a világhálóról töltöttem le. A konkrét forrásra a továbbiakban nem fogok hivatkozni; a szabadalomszám szerint könnyen megkereshetők. Aki a témában el akar mélyülni, érdemes ezeket tanulmányoznia.) Az első ilyen elvű, egy repülőgépgyárban fejlesztés alatt álló repülőgép motorja egyes alkatrészeinek mérésére készített tapintófej fotóját a **3. ábrán** láthatjuk, amelyet a korabeli koordinátamérőgépek egyikén használtak.



3. ábra: Tapintófej

McMurtry otthagya a gyárat, és a TTP-re alapozva 1973-ban *John Deer*-rel megalapította saját cégét, a *Renishaw*-t, Wotton-under-Edge városkában. Később a feltaláló számos szabadalmát fogadták el a témában, amelyeket vagy egyedül, vagy társ-feltalálókkal együtt nyújtott be. Az ilyen rendszerű mérőfejek azóta hatalmas karriert futottak be. A Renishaw folyamatosan fejleszti az immár rendszerbe foglalt TTP-családjait, és jelenleg is a szakterület vezető gyártója. Az 1940-ben született McMurtry-t pedig néhány róla szóló cikkben, vele készült riportban a méretellenőrzés Steve Jobs-ának titulálják.

Amíg a szabadalom le nem járt, a Renishaw számos pert kezdeményezett az ötletolvajokkal szemben, de a becsületesebb hosszmeréstechnikai cégek igrékeztek a McMurtry-étől eltérő szerkezeti kialakítású érintkezős tapintófejeket kidolgozni. Ilyet ismert pl. a *US 4562646* (1986), az *US 4734994* (1988), vagy az *US 4964223* (1990). Ezek közös jellemzője, hogy lényegesen bonyolultabb szerkezetűek, és általában a kinematikai hibáik is nagyobbak az eredeti TTP-énél, így mára feledésbe merültek. Magam a '80-as években a Zeiss nagy koordináta-mérőgépén láttam egy „lapozós” konstrukciójú hatalmas villamos érintkezős tapintófejet.

Az ös-szerkezet egyik első továbbfejlesztése a tapintócsúcsnak a -Z irányban – azaz „kihúzás irányában” – való elmozdíthatósága volt (*US 4451988*, *US 4136458*, *US 5505005*, *US 5339535*). Egy 1981-ben benyújtott, a manapság elterjedthez képest gyökeresen eltérő elrendezésű golyós szerkezet is ebbe a kategóriába tartozik (*US 4375723*). Utóbbi tudomásom szerint nem került gyártásba. Példák a további jobbító ötletekre: kettős rugós, töréspontos erőkarakterisztikával: *US 5208993 A*, *EP 0598709 A1*; rugó+mágnes (közel állandó erő): *US 5111592 A*; hagyományos egyrugós előfeszítés, de külső rugóval: *US 4462162*. Egy hosszú élettartamúként deklarált, kissé elbonyolított japán szerkezetet mutat be az *US2009/0133277 A1* számú szabadalom. Érdekesége, hogy az érintkezési pontok három pálcá/ferdén álló pálcapár között jönnek létre. Utóbbi elrendezést a TTP-k pontosságának javításával foglalkozó egyik szabadalom, az *US 5657549 A* is tartalmazza.

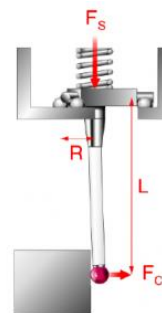
Korábban találkoztam olyan, hazai kutatóintézetben kifejlesztett, ISO-kúpra szerelt TTP-prototípussal, amelyben a csillag kerámiatestére 3 db golyó volt felragasztva. Ezeket 3-3 db golyóból álló fészkek tájolták. Az összesen 12 db, Ø2 golyó aranyozott volt (szárazon működő felületekkel), a „golyófészkek” 7 részre szegmentált vezetőrétegű nyakgyűrűre voltak felforrasztva. Nekem ez az elrendezés a mechanikai határozatlansága miatt aggályosnak tűnt. A kapcsolóstatusz átvitelére viszont nagyon szellemes, induktív elvű módszert dolgoztak ki, amit a [3]-ben részleteztem.

Lényegesebbek azonban a *statikus és dinamikus letapintási hibák* csökkentésére irányuló erőfeszítések, amelyek különböző jellegű kiegészítő érzékelőelemek alkalmazásával valósulnak meg. A statikus hibák okait a [4] Renishaw-dokumentum egyszerűen, több elhanyagolással tárgyalja. A következő pontban hasonló ábrákkal és levezetéssel, az [5] jelöléseinek megtartásával idézem ide a lényegét, számpéldával is illusztrálva.

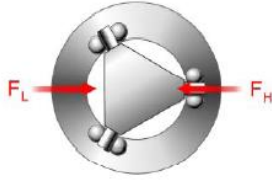
2 A TTP FELÉPÍTÉSÉBŐL, MŰKÖDÉSÉBŐL EREDŐ HIBÁK, RÖVIDEN

2.1 Statikus hibák

A **4.a. ábra** a kontaktusbontás előtti pillanatban szemlélteti a kinematikai/kinetikai viszonyokat. Az egyszerűbb tárgyalás miatt feltételezzük, hogy a háromágú „érintkezőcsillag” (azaz a belső mozgó alaptest a három pálcával) szerelési egysége abszolút merev, az L hosszúságú tapintószár pedig kör keresztmetszetű, végig azonos átmérővel.



4.a. ábra: Kontaktusbontás előtti pillanat képe



4.b. ábra: A meghajlás irányfüggősége

Az erőegyensúly ekkor a következőképpen alakul (az előjelek elhanyagolásával, abszolút értékekkel kalkulálva):

$$F_c L = F_s R, \text{ amiből } F_c = F_s R/L.$$

Az F_s a többnyire beállítható rugóerő. Az F_c erő hatására a tapintószár tapintógömb felőli vége h mértékben meghajlik (az ábrán nincs feltüntetve); ez a radiális irányú statikus hiba, ami igen alacsony megközelítési sebesség mellett rendszeres hibának tekinthető, és elvileg szoftveresen kompenzálható:

$$h = F_c L^3/3IE;$$

ahol E = a tapintószár anyagának rugalmassági modulusa, I = a tapintószár keresztmetszetének másodrendű nyomatéka (kör esetén $I = \pi r^4/4$).

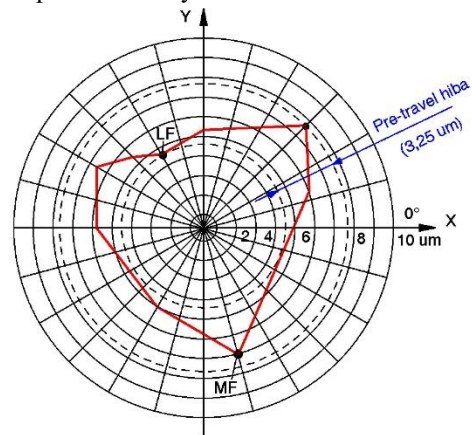
Az R szerkezeti kialakításból adódó irányfüggése miatt ez a meghajlás jellegzetes irányfüggőséget mutat. Ennek megértéséhez tekintünk a **4.b. ábrát**! Az érintkezőcsillag érintkezési pontpárjait egy egyenlő oldalú háromszög csúcsán fekvőnek képzeljük el. A háromszög geometriájából ismert, hogy a magasságvonalak (most egyben szögfelezők) $1/3 - 2/3$ arányban metszik egymást, azaz $r_2 = 2r_1$. A metszéspont itt a csillagszerelvény/tapintószár tengelyvonalában fekszik, a Z tengelyen.

A fentiekből következik, hogy ha mérendő pont oldalirányú megközelítése éppen az F_L irányából történik, akkor a csillagszerelvény az AB szakasz körül fordul el, és a C -nél szakad meg az áramkör, tehát $R = r_1$. Ha azonban éppen az F_H felől érintjük a mért darabot, akkor a forgáspont a C csúcs lesz, az áramkör megszakítása az A -nál vagy a B -nél következik be. Ekkor $R = r_2$. Az előző képletek alapján a tapintószár meghajlása R -rel egyenesen arányos, tehát a fenti két jellegzetes irányban a statikus hibák is $1:2$ arányúak lesznek. Mivel ez a jelenség 120 fokként ismétlődik, egy polárkoordináta-rendszerben a hibadiagram elvileg háromszög jellegű. Ezt a mérőgép szoftvere is figyelembe tudja (tudná) venni. Egy TP6 mérőfej bemérése során felvett hibadiagramot szemléltet az **5. ábra** (Renishaw dokumentum alapján megrajzolva). A mérés 50 mm-es mérőszáron történt, $F_c \cong 0,15$ N mellett. A diagram csak durván közelíti az elméleti egyenlőoldalú (ív)háromszöget; ez a vizsgált szerkezet további kinematikai hibáinak, ill. a mérési hibáknak tudható be. Megjegyzem, az LF minimális, ill. MF maximális kinematikai hiba különbsége (a Renishaw TTP-k adatlapján található jelölések) „Pre-travel variation” megnevezéssel – talán kontaktusbontás előtti elmozdulásnak fordíthatjuk, azaz az érintés pillanata és a

kontaktusbontás közötti eltelt idő alatti elmozdulásnak – szerepel az adatlapokon, és mikrométeres nagyságrendű.

Az axiális irányú megközelítés esete egyszerűbb, hiszen ekkor $F_c = F_s$.

Mivel a tapintószár nyomóerővel szembeni merevsége igen nagy, a rövidülésével, és ha csak nem extrém hosszúságú, akkor a kihajlásával (a szár görbülésével) sem kell számolnunk. A statikus hiba a kontaktushibákból adódik, amely azonban véletlenszerű. Az is véletlenszerű, hogy az egyes axiális megközelítések során a három kontaktuspár közül melyik bont először.



5. ábra: TP6 mérőfej bemérése során felvett hibadiagram

A fenti okfejtéseknek az a fő tanulsága, hogy amikor csak lehet, válasszuk ki a készletből a feladatra még éppen alkalmas legrövidebb, tömzsi mérőszárat! A gyári mérőszárok nagy szilárdságú, tömör korrózióálló acélból vannak, a hosszabbak kerámiából vagy szénszál merevítésű kompozitból készült csövek. A tapintógömb extra pontosságú mesterséges rubin, ill. nagy átmérők esetén héjszerű kerámia. Ezen anyagokból nagy alakpontosságú, kemény, kopásálló gömbfelület alakítható ki. Amatőrviszonyok között egy új, lehetőleg nagy pontosságú osztályú csapágygolyó is megfelel; McMurtry prototípusán is ez volt! Több forrás megemlíti, hogy ha csak lehetséges, akkor a tapintógolyót érdemes olajozni, így a kopása természetesen mérséklődik.

Egy példán keresztül nézzük meg, hogy mekkora a statikus hiba a két jellegzetes szélső esetben, egy konkrét konstrukciónál! Ehhez a **6. fejezetben** ismertetendő, saját készítésű *Touch-Trigger Probe Piezo+* adatait vesszük alapul. Ennél $L = 0,055$ m, de ebből csak az $l = 0,02$ m-es szakaszt vesszük számításba (a tapintócsap további szakasza lényegesen merevebb, amely szakasz deformációját elhanyagoljuk); $r = 0,001$ m; $r_1 \cong 0,006$ m; $r_2 \cong 0,012$ m; $E = 210$ GPa ($2,1 \cdot 10^{11}$ N/m², nagy szilárdságú acéltövezet); $F_s = 1$ N (széles határok között beállítható; ez egy közepes érték). A tapintószár keresztmetszeti tényezője (inerciája):

$$I = 3,14 \cdot 0,001^4/4 = 7,854 \cdot 10^{-13} \text{ m}^4.$$

$$F_L = F_s r_1/L = 1 \cdot 0,006/0,055 = 0,11 \text{ N}.$$

$$LF = F_L l^3/3IE = 0,11 \cdot 8 \cdot 10^{-6}/(3 \cdot 7,854 \cdot 10^{-13} \cdot 2,1 \cdot 10^{11}) = 2,651 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cong 2,65 \mu\text{m}.$$

$$F_H = 2F_L = 0,22 \text{ N}; LH = 2LF = 5,3 \mu\text{m}.$$

Az F_c rugóerő mérséklésével az LF és ezzel az LH is csökkenthetők lennének – ha házilagosan is képesek lennének olyan minőségű érintkezést biztosítani, amilyenekkel a gyári mérőfejekben találkozhatunk. Erről röviden a 3. pontban lesz szó. Megjegyzem, hogy a fenti eredmények csak az érintkezőcsillaggal merev kapcsolatban levő tapintószárra érvényesek! Később látni fogjuk, hogy a címbeli mérőfejre ez így nem teljesen igaz, mert egy membrán is beiktatódik az erőláncolatba.

A statikus hiba további csökkentésének lehetősége a minél rövidebb tapintószár választásán felül a nagyobb rugalmassági modulusú anyag – pl. kerámia – felhasználása, de igazán hatékony módszer az inercia növelése, ami a szár sugarának negyedik hatványával arányos! Jó választás lehet, ha a tapintószárat pl. régi kerámia csőkondenzátor testéből alakítjuk ki.

A fenti gondolatmenet a probléma erősen leegyszerűsített tárgyalását nyújtja, mert többek között nem foglalkozik a pontszerű érintkezéseknél létre jövő Hertz-feszültség okozta deformációval. Ugyancsak statikus hibát okoz a tapintógömb alakhibája, ami ma már tized mikron nagyságrendben tartható. Az érdeklődők részletes analízist kaphatnak pl. az [5]-ből.

2.2 Dinamikus hibák

Amennyiben a mérés során nagyon lassan közelítjük meg az érintési pontokat, csak a fenti, viszonylag jól meghatározható hibákra kell tekintettel lennünk. Am a korszerű ipari méréstechnikában törekszünk a geometriai mérések minél gyorsabbá tételére is, azaz a koordinátamérőgépek is relatíve nagy sebességgel dolgoznak. Ez a sietség további, a statikus hibáknál nagyságrendekkel nagyobb hibákat okozhat: végső soron jelentősen nőnek a mérőfej letapintási sebességéből adódó mérőszár-deformációk. Arról van szó, hogy a háromágú csillagszerelvénynek van valamekkora tömege, annak pedig az elmozdítással, kifordítással szemben tanúsított ellenállása, tehetetlensége. Newton 2. Törvénye, melynek lényege az $F = m \cdot a$ összefüggés, ami az m tömeg a gyorsulásának eléréséhez szükséges erőt fejezi ki. Ez egyenes vonalú, egyenletes mozgásra vonatkozik ugyan, de jó közelítéssel a mi, kis szögelfordulásokkal járó esetünkre is értelmezhető. A gyorsulás a letapintás során negatív (azaz valójában lassulás): az eredetileg valamilyen sebességgel haladó tapintógömb ütközésekor lép fel). Közben jelentős hajlítóerő keletkezhet, ami a tapintószárat nagyságrendekkel nagyobb mértékben deformálhatja, mint az előző pontban vázolt statikus erők! A dinamikus hiba számítása nagyon bonyolult, a modern numerikus módszerekkel, számítógépes végeelem-analízisekkel végezhető el. Az azért nyilvánvaló, hogy érdemes a mozgó tömeget minél kisebbre redukálni. Jól példázza ezt a törekvést a 6. ábra, [6]-ról származó fotója, ami egy Renishaw TTP kontaktusrendszeréről készült. Jól látható, hogy a csillagszerelvényt igyekeztek kikönnnyíteni.

A TTP-k statikus és dinamikus hibáinak részletes analízise a neten több tudományos közleményben is szerepel, ám sajnos, ezek zömmel fizetősek. Nem fizetős pl. a [7], amely egy TP6 és egy OMP6-2 típusú TTP statikus és dinamikus hibavizsgálatának mérési módszereit, eszközeit mutatja be, és közzé teszi a mérési eredményeket, nagyon szemléletes térbeli diagramok formájában is. Az ilyen cikkeket tanulmányozva megállapíthatjuk, hogy a kézi mozgató koordinátamérőgépeknél, ahol a megközelítés sebessége lényegében

véletlenszerű, a dinamikus hibák is véletlenszerűek lesznek, míg a CNC (motoros mozgató) gépeknél a szoftver közvetlenül az érintési pont elérése előtt csökkenti a közelítés sebességét, a még megmaradó dinamikus hatásokat pedig számításba tudja venni.



6. ábra: Renishaw TTP kontaktusrendszere

3 KONTAKTUSPROBLÉMÁK

Az angol nyelvű szakirodalomban ezt a 6 golyó/3 pálcá (vagy 3 golyó/6 pálcá) 6 db érintkezési pontja valamelyikének megszűnésén alapuló mérőfejet Kinematic resistive probe (kinematikus rezisztív mérőfej) megnevezéssel is illetik. A golyók/pálcák nagyon korrektil definiált érintkezési pontjai kiváló geometriai ismételhetőséget biztosítanak, hiszen a tapintógömb térbeli helyzetét elvileg tized mikrométer alatti hibával tarthatják az általuk közvetve meghatározott pozícióban. Ez maga a kinematikai rendszer. A sorba kapcsoldó hat kontaktuspárnak van egy eredő nyugalmi ellenállása; innen a „rezisztív” szó. A kitérés során először ez az ellenállás növekszik, ahogy az érintkezők rugalmas deformációja fokozatosan megszűnik, majd gyakorlatilag végtelenné válik. A kontaktusrendszerhez kapcsolt jelkondicionáló áramkör az ellenállásnövekedés meghatározott mértékénél átbillen, a kimenete logikai szintet vált. A nyugalmi átmeneti ellenállás azonban nem stabil: függ például a szorítóerőtől, a felületek oxidálódásától, a működési ciklusok közben fellépő kopástól, oxidációtól és az esetleges szennyeződésektől. Találtam olyan szabadalmi leírást (EP 0501680 A1), amelyben pl. autozéró-áramkörrel mérsékelnék a problémát, míg egy másikban váltófeszültségű áramkörbe iktatnák be a TTP-t (EP 0501681 A1).

Az érintkezőelemek anyaga nagyon precízen megmunkált, a gyártó által nem részletezett összetételű keményfém (ám valószínűbb, hogy egyszerűen wofrámm; [8]), amelyet valamilyen kontaktfolyadékkal vonnak be. Mondanom sem kell, hogy a Renishaw nem közli az általa használt kontaktfolyadék mibenlétét sem. A saját készítésű példányoknál kipróbáltam a közismert, WD-40 univerzális kenőanyagot, amit a gyártó kontaktjavítóként is ajánl. Ebből egy kis adagot kifújunk egy apró tálkába, és innen kenjük fel a golyók, görgök felületére. (Az olajról, mint kontaktfolyadékról a [9]-ben emlékeztek meg röviden. Aki e régi lapszámhoz nem tud hozzájutni, annak a [10]-et ajánlom.)

4 A TTP HIBÁINAK CSÖKKENTÉSE

A hobbisták (pl. hobby CNC-építők) számára a 2.1. végén kiszámolt statikus hibák elfogadhatónak látszanak, hiszen a házi készítésű gépek szánmozgatásának felbontása 10 μm nagyságrendben van, a gépek kinematikai hibái pedig ennél nagyobbak. Azonban a neten meglehetősen precíz házi készítésű szerszámgépekkel is találkozhatunk, és ki tudja, mit hoz a jövő? A forgácsolással foglalkozó mikroállalkozásoknak már most is lehetnek nagy pontosságú szerszámgépeik, de nem biztos, hogy egy méregdrága mérőfej-rendszer megvásárlását megengedhetik maguknak. Ha a hobbisták céljainak egyelőre akár egy fából készült, a golyókat félgömbfejű csavarokkal helyettesítő, házilag barkácsolt TTP-konstrukció ([11]) talán meg is felel, lehet, hogy nemsokára jóval pontosabb, de még mindig házilag elkészíthető mérőfejre lesz szükségük!

Az iparban a pontosság növelésének az igénye már régen megfogalmazódott, és természetesen számos szabadalom született a TTP eredő statikus és dinamikus hibáinak mérséklésére. A döntő többségük valamilyen analóg jelátalakító(k) beépítésével oldaná meg a problémát. Így voltak induktív (pl. *US 4443946*) vagy kapacitív (pl. *US 6683780 B2*) elmozdulásérzékelőkre vonatkozó elképzelések, amelyek zömmel abból indultak ki, hogy a csillag elmozdulásának a tapintógömb bármilyen irányú kitérésekor végső soron van egy tapintószár tengelye irányába mutató komponense, amit a fenti módon érzékelni lehet. A 4443946-ban háromágú csillag helyett egy tárcsa pereme támaszkodik fel, egy jelfogós (!) feszültségosztó-átkapcsolóval gondoskodik a feltaláló arról, hogy a Z irányú érzékenység se legyen sokkal nagyobb, mint a vízszintes irányú, így az elmozdulással közel arányos analóg jel nyerhető, bár a kitérés irányát csupán ebből nem lehetne megállapítani. Nincs ugyan további érzékelője, de McMurtry az *EP 0598709 A1* számú szabadalmában egy rugalmasan illeszkedő peremes alkatrészsel (serleggel) javasolta a hagyományos TTP statikus hibáját csökkenteni, de ez alighanem nem váltotta be a hozzá fűzött reményeket.

Született elképzelés olyan interferometrikus rendszerre is, ami szerint a tapintóházban Michelson-jellegű interferométer van, amelynek mérőkarját csőszzerű tapintószár képezi, a végében, a tapintógömb fölé beépített tükörrel (*US 5118956*): ez lenne az interferométer mérőkarja. Elképzelhető, hogy mennyire kényes egy ilyen rendszer a legkisebb elállítódásra még akkor is, ha tükör helyett apró szögprizmát építenének be! (A gyakorlatban elkerülhetetlen, a mérési feladathoz alkalmazkodó tapintószár-csere ui. csak azzal volna lehetséges.)

A korai elképzelésekben gyakran szerepelt a *piezoelektromos átalakítók* alkalmazása; erre később visszatérek.

A számos ötlet közül mára két fő termékcsalád kristályosodott ki a Renishaw-nál: a nyúlásmérő bélyeges és az analóg optikai átalakítók alapuló konstrukció.

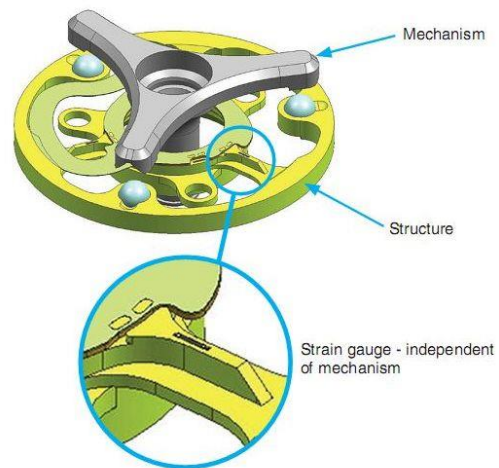
4.1 Nyúlásmérő bélyeges TTP-k

Ezekben a mérőfejekben a golyópáros/pálcacsillagos rendszer feladata a mérőszár, és ezzel a tapintógömb térbeli nyugalmi pozíciójának szabatos biztosítása, kimozdulásának lehetővé tétele, tehát a tájolóelemek nincsenek áramkörbe kapcsolva. (Ígazából nem is helyes

TTP-nek nevezni sem ezeket, sem a következő pontban tárgyalt mérőfejeket. Megszokásból mégis maradunk ennél a titulussnál.)

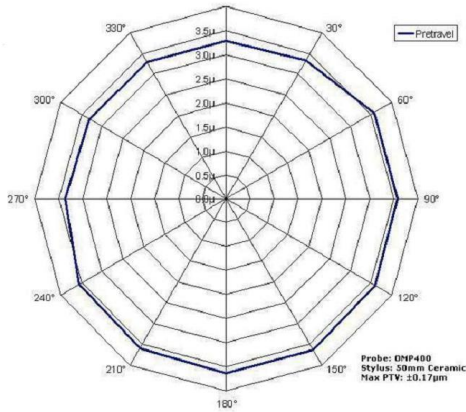
A korai (1984-ben közzé tett) *US 4462162* szabadalom többféle nyúlásmérő bélyeges – és egy induktív elmozdulásérzéklős – konstrukciót is bemutat. Érdekes az *US 5090131* koncepciója is, de a ténylegesen megvalósult, gyártásba került típusok felépítése jelentősen más, az *US 2010/0292956 A1*-ben ismertetettre hasonlít. Az első, nyúlásmérő bélyegeket tartalmazó tapintófej a Renishaw MP250 volt, majd követte az OMP400 (az „O” betű az optikai – azaz a tapintófej és tipikusan a CNC szerszámgép vezérlése közötti infravörös – jelátvitellel utal). Jelen cikk írásakor a legfejlettebb típus az OMP600, az MP700 rendszer és az RMP600 volt [12]. Utóbbi rádiós jelátvitelű. Amúgy az IR jelátvitel sem teljesen új a TTP-k területén: Az *US 4608763* egy kompakt, telesop táplálású egységet mutat be, metszetrajz és kapcsolási vázlat szintjén. Hagyományos, érintkezős rendszer vezérli az öttranzistoros áramkört, melynek alapja egy 150...200 kHz-es Colpitts oszcillátor. A TTP ennek frekvenciáját kapcsolja át. A modern optikai átvitel már kétirányú: a mérőegység parancsokat képes fogadni. Házilag elkészíthető, nagyon gyorsan reagáló, egyirányú IR-átvitelű rendszert mutat be a [13].

Az előbb felsorolt gyártmányok RENGAGE™ mérőrendszerének vázlatát a 7. ábra mutatja ([14]). Egy háromküllös „kerék” látunk a grafikán, amely az „agyrésznél” fogva három csavarral erősíthető belülről a tapintóházhoz. A küllőkre egy-egy szilícium (piezorezisztív) nyúlásmérő rudacska rögzítettek; nem hagyományos nyúlásmérő bélyegekről van tehát szó, inkább mikromechanikai konstrukcióról!



7. ábra: RENGAGE™ mérőrendszer vázlat

A kerék abroncsába beágyazva három kerámia golyó is látható, amelyek a tapintószárat is tartó merev, háromágú csillag „V” alakú árkaiba hatolnak be, szabatosan tájolóva a tapintószárat. A szerelvényt egy, itt nem ábrázolt nyomórugó szorítja a kerékhez, a szokásos módon. Ez a rendszer szubmikronos érzékenységű, és jóval kisebb hajlítóerővel terheli a tapintószárat a jelzés kiváltásakor, mint a klasszikus felépítésű „Touch-Trigger Probe”-ban. A 8. ábra egy OMP400 típusú, RERANGE rendszerű mérőfej hibagömbjét tünteti fel. Dacára az 50 mm hosszúságú – igaz, kerámiából készült – mérőszárnak, a maximális pre-travel hiba csupán $\pm 0,17 \mu\text{m}$!



8. ábra: OMP400 típusú RARENGE mérőfej hibagörbéje



9.a. ábra: Membránrugó-pár

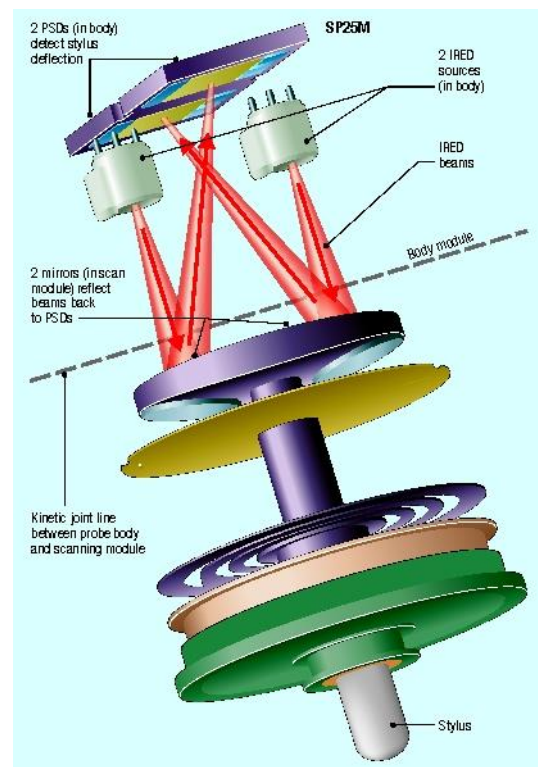
Sajnos, a nyúlásmérő bélyeges tapintók jelkondicionáló áramköréről semmit nem árul el a gyártó. Az EP 0242747 A2 szabadalmi leírás tartalmaz vázlatos kapcsolási rajzokat is, az US 7689379 B2 pedig sokat elmond a hárombélyeges rendszer által nyújtott *analóg pozíciómeghatározási módszer* lehetőségéről. Még részletesebb elvi magyarázatot nyújt az ilyen konstrukciókról az US 2009/0043534 A1.

4.2 Optoelektronikai elvű TTP-k

Egy optikai koncepciót korábban megemlítettem, de számos más elven működő optikai tapintót szabadalmaztattak már. Modern elképzeléseket tükröz például az 1988-ban közzé tett US 5825666 A számú szabadalom, amely optikai a tapintószár elmozdulását képbontó eszköz közvetítésével értékelné ki.

A ténylegesen megvalósult, gyártásba került RENISHAW SP25M alapú, elemekből összeállítható tapintócsalád analóg optikai elven érzékeli a tapintócsap nyugalmi helyzetéből bármely irányban történő kimozdulását. A tapintócsapot ezáltal nem a megszokott, golyópárokból és pálcacsillagból álló mechanika, hanem speciális kiképzésű, szabadalmaztatott, kellően merev membránrugó-pár igyekszik stabil pozícióban tartani (9.a ábra).

Az alsó rugó minden irányú elmozdulást megenged, a felső csak Z (azaz tengely-) irányút. A látszat ellenére a rendszer stabilitása igen nagy: egy 200 mm hosszúságú – tehát viszonylag súlyos – tapintószár legfeljebb 4 µm-es mérési bizonytalanságot okoz a 21 mm-es tapintószárhoz képest! A rugórendszer további előnye, hogy az oldalirányú kitérés érzékenysége közel független a kitérés irányától, szemben a hagyományos Touch-Trigger Probe rendszerével, ráadásul *megengedi a tapintószár -Z irányú elmozdulását* is anélkül, hogy ehhez a mechanikát alaposan el kellene bonyolítani! (Hasonlót pl. az US 5345689, vagy az US 7146741 ismertet.) Az ilyen membránrugók szerkesztése mára külön tudománnyá vált: a neten több tanulmány részletezi a hasonló csukló-/vezetőelemek elméleti hátterét, méretezését; a cikk végén egyet ki is emelek.



9.b. ábra: A tapintófej optomechanikai rendszerének vázlata

A tapintófej optomechanikai rendszerének vázlatát a 9.b ábra mutatja. A tapintóházhoz rögzített két, itt szürkére színezett IR sugárforrás (LED-et és kollimátorlencsét tartalmazó tubus) fénye a tájolórugórendszerhez erősített mozgó platformon rögzített két homorú tükörrre vetül, amelyek a sugarakat a fölül látható, sárgára színezett két PSD-re (Position Sensing Detector) vetítik. Ezek nem mások, mint nagy felületű négyzetes PIN fotodiódák, melyeknek négy anódkivezetése van, a négyzet négy oldaláról. Utóbbiakhoz transzkonduktancia-erősítőkből és OPA-s műveletvégző áramkörökből álló áramköri környezet csatlakozik. Az elektronikai hálózat X, Y kimenetéről elvezethető feszültségjel közel arányos a kerek fényfoltok a lapka középpontjától mért X, ill. Y irányú távolságával.

A két, kitérő irányú fénysugárra a Z irányú elmozdulás mérése érdekében van szükség. (Az optikai rendszer lényegében az US 2002/0174556 A1 szabadalomban

lefejtett konstrukciós elveken alapszik, persze azokat továbbfejlesztve. Más optikai elemekkel és sugárutakkal, de 3 db PSD-n alapul az *US 2006/0070253 A1* számú szabadalom.)

Azért tájolóhornyok és pálcacsillag ebben a műszer családban is van, bár az érzékelésben ugyanúgy nincs szerepük, mint a nyúlásmérő bélyeges társaikban, sőt normális esetben a tapintás közben el sem mozdulnak egymáshoz képest! A tapintószár pozícióját ezek határozzák meg az eleve két egységből összeállítható tapintóház alsó elemének elmozduló egységén, a ház két alapelemét pedig négy apró állandómágnés-korongpár fogja össze. Ez a moduláris koncepció rendkívül leegyszerűsíti a tapintószárak automatikus, programozott cseréjét a CNC mérőgépeken, sőt, megakadályozza a kezelési hibából származó törést is. Túlmozduláskor ui. a tapintószárat a mágnesek egyszerűen elengedik, az sérülés nélkül leválik. Ez sem teljesen új ötlet, pl. az *US 7676945 B2*, az *US 5918378 A*, vagy az *US 5404649* szabadalom mutat be hasonlót. Kétségtől szellemes megoldás, és lényegesen költségkímélőbb, mintha az összes tapintószárhoz egy-egy önálló mérőfej tartozna! Erre a következő pontban visszatérek. A hagyományos felépítésű, 5 vagy 6 irányú (azaz -Z mentén is elmozdítható tapintószárú) TP20 esetén hasonló elvet követtek, csak hogy itt a maga a mérőegység választható le tapintószárustól a koordináta-mérőgépbe befogott alaptestéről.

Az SP25M eleve *kontúrkövetésre* készült – és mint ilyen, alighanem a világ legkisebb, legkompaktabb tapintórendszere –, de a TP20 TTP-t illesztve hozzá, hagyományos, ponttapintású mérőfejként viselkedik.

5 PIEZOKRISTÁLY A TTP-BEN

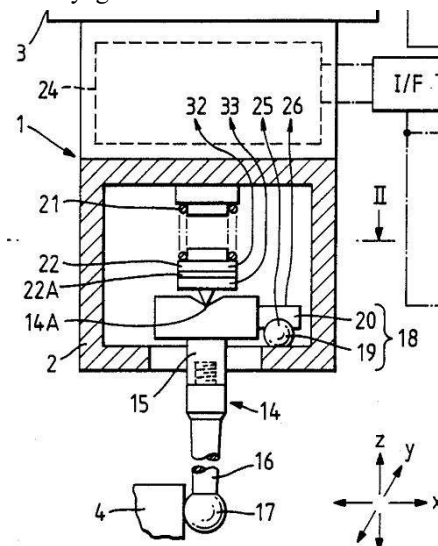
Az eddigiek tanulmányozása után azt gondolhatjuk, hogy eleget tudunk a TTP-kről ahhoz, hogy megszerkesszük a saját, nyúlásmérő bélyegekkel vagy optikai elmozdulásérzékelőkkel kiegészített, csekély statikus és dinamikus hibával rendelkező tapintónkat. Ne siessük el a dolgot! A nyúlásmérő bélyegek nagyon drágák, a felragasztásuk is különleges ragasztót, technológiát és nagy gyakorlatot igényel, és a „küllős kerék” anyag kiválasztása, hőkezelése, megmunkálása sem túlságosan könnyű kihívás még egy profi finommechanikai üzem számára sem! Az optikai rendszer házilagos kivitelezése sem kifejezetten egyszerű, bár ha a rugómembránok helyett maradunk a hagyományos TTP-mechanikánál, és lemondunk a -Z irányú elmozdulás lehetőségéről, talán célhoz érhetünk. Jelen írás szerzője a '80-as években már kísérletezett CD-meghajtókból származó olvasófejek elemeinek felhasználásával. Egy más alapú, sajátos rendszerű, saját fejlesztésű optoelektronikai érzékelő részletes ismertetése a [15]-ben található meg.

Mégis, e helyett tekintsük inkább a cím szerinti módszert, a piezokristály alkalmazását. Naná, hogy a neten kutakodva ilyen témájú szabadalmi leírások sokaságát is felleljük! Igaz, nem nagyon találunk a gyártók választékában piezo érzékelőelemmel kiegészített TTP-t, bár pl. a NIKON Metrology a [16]-ban javasol ilyen elvű tapintót a koordináta-mérőgépeihez, de típust nem jelöl meg.

Korábban említettem, hogy a csillagegység elmozdulásának minden érintés során van egy tengelyirányú komponense. Ezt McMurtry is kihasználhatónak vélte, és 1980-ban be is nyújtotta a már említett, később *US 4443946* számon közzé tett szabadalmi igényét. Ugyanó kért szabadalmat 1984-ben a teljesen hasonló elven, de az induktív elmozdulás-érzékelő helyett piezomembránt alkalmazó konstrukcióra, amit *US 4854050* számon adtak meg. Nagyon hasonló konstrukciót ismert az *US 4702013*, az *US 4780963*, ill. az *US 4769919* számú szabadalom is. Persze mások sem tétlenkedtek piezós TTP-ügyben. Érdekes elgondolás az *US 6708420 B1*, mereven rögzített tapintószárú, de a szárba iktatott rugalmas elemmel – „lírával” – ellátott mérőegység. Szintén érdekes elképzelést tükröz az *EP 0605140 A1*. Ebben a TTP-mechanika csillagegységébe beépített, 120 fokban elhelyezett, tárcsa alakú piezoelem-párok szerepelnek. A Zeiss már különleges kialakítású rugómembránokat épített volna be piezotapintójába, a szokásos TTP-mechanika helyett (*US 5111592*).

Házilagos megvalósítás szempontjából McMurtry eredeti elképzelése látszott a legmegfelelőbbnek, mert egyszerű alakú alkatrészekből épül fel, a piezokristály pedig olyan, fémtárcsára ragasztott lapka lehet, amit zümmerként árusítanak, számos olcsó (akár roncs) elektronikai kütyüben is megtalálható, de könnyen, olcsón be is szerezhető.

Tekintsük például az *US 4854050* számú, *Contact-sensing probe* című szabadalmi leírás 1. ábráját, amelynek számunkra lényeges részletét a **10. ábrán** kiemeltem.



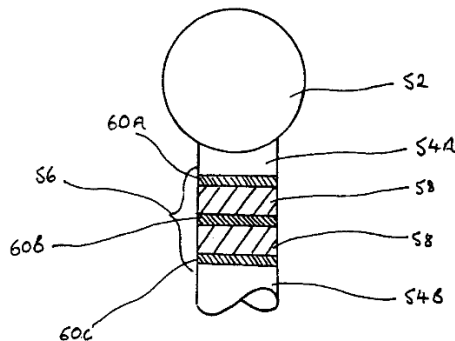
10. ábra: Contact-sensing probe - részlet

Egy hagyományos TTP-hez hasonló szerkezetet látunk, amelyben a 14 - 17 elemeket és a 20 pálcákat is magában foglaló mozgó részt a 21 rugó szorítja a 19 érintkezőgolyók közé. A rugó és az érintkezőcsillag közé azonban további szerkezeti elemek (14A, 22, 22A 32, 33) is be vannak iktatva; a rugóerő ezeken keresztül adódik át a csillagra. A 22A elem maga a piezokerámia lapka, amire a mozgó egység elmozdulásának függőleges komponense által kifejtett erő hat.

Elkészítettem, kipróbáltam. Sajnos, a tapintóház kocogtatására majdnem olyan érzékenynek bizonyult, mint a tapintószárára.

Találtam egy érdekes elgondolást, amely *aktív piezos*: a tapintócsúcsot rezgeti (US2009/0320553A1, US007856731B2). A felülettel való érintkezést a rezgés csillapításán keresztül érzékeli. A továbbiakban ezzel nem foglalkozom, bár az ötlet meggondolandó.

Végül egy további problémát is meg kell említenünk. Acélban a hang terjedési sebessége mintegy 5100 m/s, azaz 1 μ s alatt 5,1 mm-t tesz meg a lökéshullám az anyagban. Például egy 50 mm-es tapintószárban eleve 10 μ s körüli a késleltetés. Ha a tapintófej haladási sebessége 100 mm/s = 100 000 μ m/s, akkor ebből 10 μ s alatt 1 μ m rendszeres, azaz szoftveresen korrigálható késleltetési hiba keletkezik. A minél nagyobb pontosság érdekében jobb lenne a piezoelemeket közvetlenül a tapintógömb mögött elhelyezni. Ezt a törekvést tükrözi az EP 0420416 A2, ill. az EP 0420416 A3, 1991-ben közzé tett szabadalom, amelynek egy ábráját ide idézem; ez pontosan a fenti konstrukciós elvet tükrözi (11. ábra; a piezolapok az 58-as számú tételek). A dolognak az a hátulütője, hogy tovább drágítaná az amúgy sem olcsó TTP-t és tapintókészletét (az SP25 rendszer árajánlatát lásd pl.: <http://www.thecmmstore.com/products/probe-system/probe-body/sp-25/default.html>). Mások a nyúlásmérő bélyegeket is felragasztották volna a mérőszárra (US 2005/0283990 A1), és a 4. fejezetben említett interferométeres tapintó is nyilván ugyanezt a problémát kívánta volna kiküszöbölni.



11. ábra: EP 0420416 Szabadalom - részlet



12. ábra: SP25M és SM25-1-mágnesesen „feltapadó” tapintószár

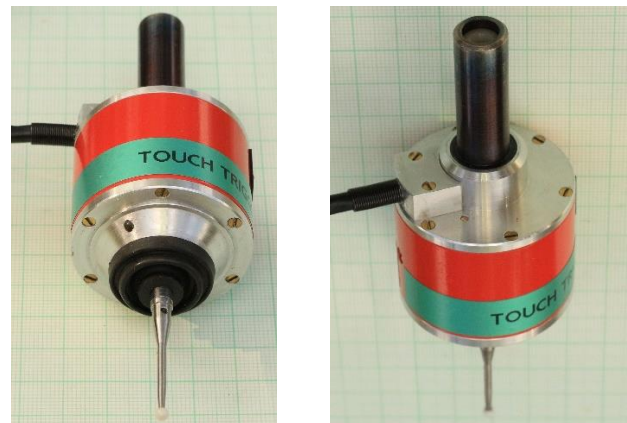
A hagyományos konstrukciók esetén alkalmazott lehető legrövidebb tapintószár ezt a hatást is enyhíti. Az SP25 optikai mérőfej-rendszerrel különböző hosszúságú SM25-x, tapintószárat befogadó membránrugós/tükrös egységek

(5 féle van) illeszthetők az SP25M alapegység és a mágnesesen „feltapadó” tapintószárak közé. Így a mérési ponthoz való hozzáférés sokszor nem a kevésbé merev tapintószár hosszának növelésével valósul meg. Persze, minden SM25-x egységbe a hosszához illeszkedő fókuszú tükröket szereltek. Egy lehetséges összeállítás elemeit láthatjuk a 12. ábrán.

6 TOUCH-TRIGGER PROBE PIEZO+

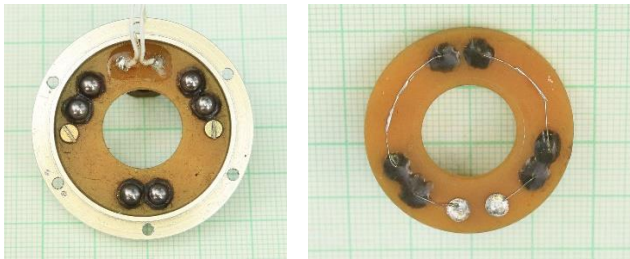
6.1 Mechanika

Egy ilyen precíziós finommechanikai konstrukció elkészítése a mechanikai műszerész munkában való nagy jártasságot, megfelelő felszerelést (minimum egy jól felszerelt esztergapadot) és komoly türelmet igényel. A következőkben nem is adok pontos alkatrészrajzokat és részletes legyártási útmutatókat, csupán a lényegesebb szempontokat említem meg. A konstrukciós részletek tekintetében mindenki járjon el a saját tapasztalatai, felkészültsége és lehetősége szerint!



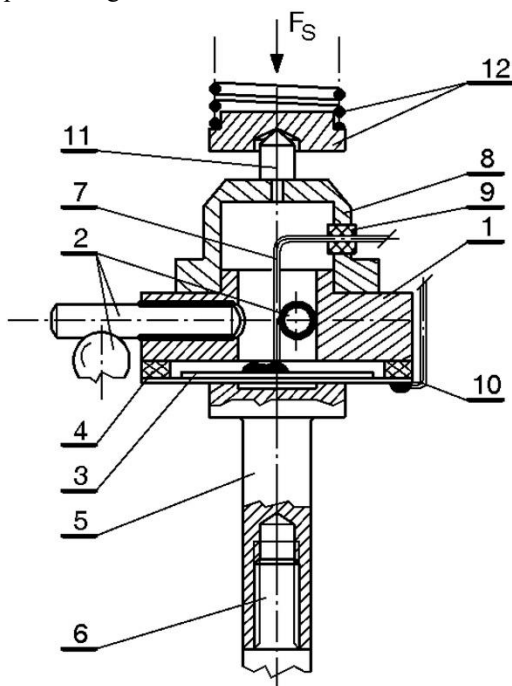
13. ábra: Saját prototípus külső fotói

A komplett, $\varnothing 42 \times 72$ mm befoglaló méretű, $\varnothing 12$ mm-es befogószáru prototípus külső fotói a 13. ábrán láthatók. A tapintóház egy esztergált alumínium cső, amelyhez M2-es csavarokkal erősítettem hozzá az alsó és a felső szerelőpajzsot. Előbbi belső, gyűrű alakú hornyába van becsavarozva az $\varnothing 33 \times \varnothing 15 \times 1,5$ nyákgyűrű, amin azonban nincs rézréteg. A gyűrűbe, 25 mm átmérőjű körön, 120 fokos osztással $\varnothing 3,7$ mm-es furatpárokat készítettem, a furatokba a 4 mm-es csapágygolyókat ragasztottam, kétkomponensű, nagy kötésszilárdságú fémragasztóval. Előtte a golyó felületének egyik felét szikraerózióval feldurvítottam. Ezt a műveletet ugyanazzal a célhegesztőkészülékkel ([17]) végeztem, amivel a hozzávezető huzalokat is a golyókhoz hegesztettem. A kontaktusegység kivezetéseit 2 db 2 mm-es csőszegecs képezi. A felhegesztett huzalokat a golyók beragasztása után egymáshoz és a csőszegecsekhez forrasztottam. Az elmondottak a 14. ábrán jól megfigyelhetők.



14. ábra: Elkészített szerkezet

A mozgó rész metszetrajzát a **15. ábra** mutatja. Az alapja az *1* alumínium alaptest (gyűrű), amelybe a 3 db 2 helyező/érintkező pálcá van beragasztva, 120 fokos szögben (az egyik golyót is ábrázoltam). Az alaptest aljához van ragasztva a 3 piezozümmber-lapka, a 4 nyákgyűrű közbeiktatásával. A lapka hátoldalához, azzal, egyben az alaptesttel egytengelyűen helyezkedik el az 5 sárgaréz szárbefogó (szintén felragasztva), amibe a 6 tapintószár csavarható be. A lapka „meleg” kivezetése a 7 hajlékony, szigetelt sodrat, ami a 8 alumínium kupakba sajtolt 9 műanyag védőcsövecskén bújik ki. A testpotenciálú 10 sodratot a zümmberlapka hátoldalra forrasztottam fel. A szerelvényre az F_s szorítóerő a 11 kúpos acéltüskén keresztül adódik át, a 12 elemekkel jelképezett erőgenerátorról.

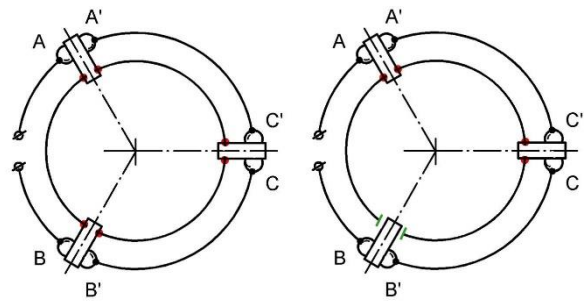


15. ábra: A mozgó rész metszetrajza

Az így befoglalt lapka mind szimmetrikus deformáció hatására (tengelyirányú nyomásra), mind féloldalas hajlításra (a tapintógömb sugárirányú kitérésére) feszültségjelet produkál.

Itt egy kis kitérőt kell tennem az érintkezőcsillag tárgyában, mert egy egyszerű tényre a szakirodalom soha nem hívja fel a figyelmet. A [6] külföldi netes fórumon vetődött fel a kérdés egy eredeti Renishaw-tapintóval kapcsolatban, hogy miként lehetséges az, hogy szétszedés és összeszerelés után csak a háromágú „csillag” két pozíciójában működik helyesen a TTP, a harmadik lehetséges pozícióban pedig nem? Ráadásul a csillag

fémtestétől csak az egyik pálcá van elektromosan elszigetelve! Ennek megértéséhez tekintük a **16. ábrát!**

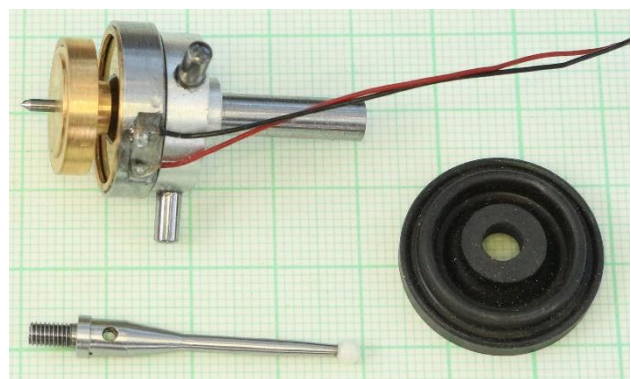


16. ábra: Az érintkezőcsillag szigetelése

A **16.a ábrán** a csillag pálcái be vannak sajtolva a mozgó fémtömbbe, azaz egymással galvanikus kapcsolatba kerülnek. Ha a mérés során az *A-A'* vagy a *B-B'* kontaktpár szakad meg, akkor nincs probléma, az elvezetések között is szakadás keletkezik. Ha viszont a *C-C'* közül emelkedik ki a pálcá, a másik kettő a helyén marad, akkor az *A* és *B* golyó között megmarad a kontaktus, ezzel az elvezetések között továbbra is rövidzár mérhető! Ha a **16.b ábra** szerint az alsó két pálcá közül valamelyiket elszigeteljük a többitől (a példában a bal alsót), akkor ezt a problémát kiküszöböltük. A fenti kérdés ezzel meg is oldódott, bár a házi készítésű mérőfejünkben mindhárom pálcát elszigeteltük úgy, hogy a szigetelési ellenállása 20 Mohmos méréshatárú ellenállásmérővel sem mérhető.

A 19 mm átmérőjű zümmberlapkának először a kerámia felőli oldalára ragasztottam a 0,6 mm-es, kétoldalon fóliázott nyákból esztergált Ø15,5/Ø19 mm-es 4 gyűrűt. A fémezett felületre a lapka tengelyvonalaiban a vékony, piros szigetelésű kivezetősodratot (7) forrasztottam. A forrasztásokat óvatosan, kis ónpötty hátrahagyásával kell elvégezni! A 10 testelő sodrat fekete színű. Végül a lapkaszerelvényt a helyére ragasztottam. A fém alkatrészek egymáshoz ragasztása a már említett fémmagasztóval történt. Nyákmez helyett sárgaréz- vagy acéllemezből készített gyűrű ugyanúgy megfelel.

Ez az elrendezés nagyjából a 11. ábra szerinti – elméleti – elképzelés előnyével kecsegtet abban a tekintetben, hogy a lapka közvetlenül a tapintószár erőfolyamába van beiktatva, ezzel kisebb zavarérzékenységet ígér, mint a 10. ábrán, ill. a US 4854050 számú szabadalom további ábráin bemutatott vázlatok.

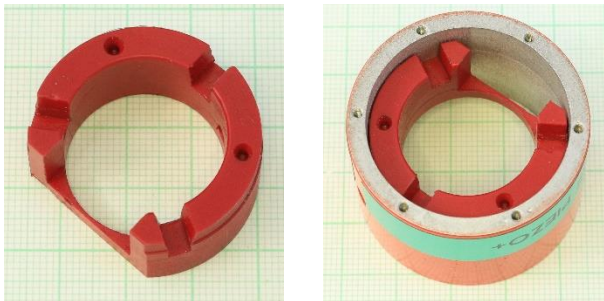


17. ábra: Alumínium testű komplett érintkezőcsillag

A **17. ábrán** az alumínium testű komplett érintkezőcsillag fotója látható, a kiegészítő szerelvényeivel. A csillagszerelvénytől jobbra szerepel a képen a gumi védőharmonika, ami meggátolja a szennyeződések bejutását a tapintóház belsejébe úgy, hogy közben alig akadályozza a tapintószár mozgását. Felszerelve a 13. ábrán látszik.

Alul egy tapintószár fekszik, természetesen M3 menettel, az elülső végén egy nagy pontosságú, Ø3 mm-es kerámia golyóval. Egy puha esztergapatronba fogott golyóba fogászati gyémántfűrővel kb. 1,5 mm mély zsákfuratot képeztem ki, amibe a szár levékonyított végét az említett fémgrasztóval beragasztottam. A szár tövénél levő keresztirányú furat annak szilárd rögzítésére szolgál: a helyére csavarás után egy acélpálcikával a csavarkötést jól meg kell szorítani, különben a mérést hiszterézishiba is terheli fogja!

A csőszerű házba egy M3-as csavarral rögzítettem a **18. ábrán** látható, ipari műanyagból esztergált/mart alkatrészt. Ennek fő feladata a csillag elfordulás elleni biztosítása, hogy a pálcák mindig visszataláljanak a golyók közé. Az elfordulás-gátlásra akkor is szükség van, ha a tapintószárat be- vagy kicsavarjuk. Az alkatrészen ejtett lelapolás és bemarás a kontaktuspanel két vezetékének és a piezó testhuzaljának átvezetésére szolgál.



18. ábra: A csillag elfordulás elleni biztosítása

A felső szerelőpajzs (ez is a 13. ábrán figyelhető meg) is alumíniumötvözetből készült. Ebbe van besajtolva/beragasztva az acél befogószár. Utóbbi is csőszerű, M8×1 belső menettel, ahova az általam erőgenerátornak nevezett nyomórugós szerelési egység belső kulcsnyílású állítócsavarját lehet becsavarni (**19. ábra**).

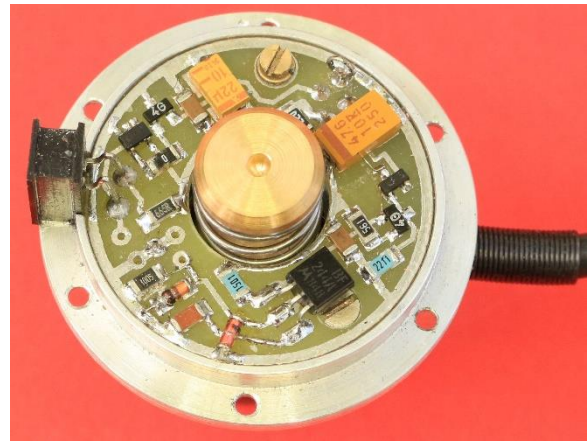


19. ábra: Rugós erőgenerátor

A rugó bal oldali végébe illeszkedik a zsákfuratos nyomóelem (ez fogadja be a mozgó szerelvény tuskóját). Alul az imbuszkulcs fekszik, amivel végső soron az F_s

erőt lehet kívülről, a tapintó felfogószárának menetes furatán keresztül beállítani. *A terhelés során óvatosan kell eljárni, mert túlfeszítés esetén a kerámialapka elpattanhat!*

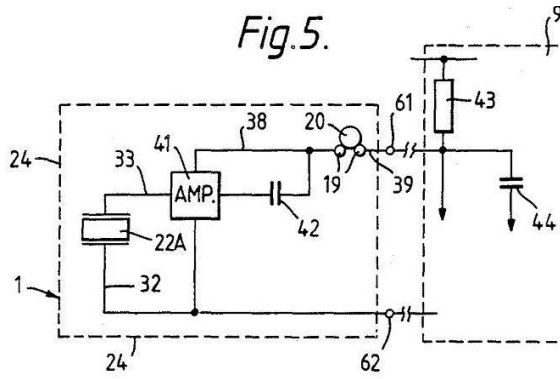
A hátsó pajzsra szereltem az egyedi gyártású kábelrögzítőt és rugós törésgátlót a négyeres árnyékolt kábel számára, a belül kiképzett gyűrű alakú hornyába pedig a felületszerelt jelkondicionáló panelt szereltem be, 2 db M2-es csavarral (**20. ábra**; az áramkör a 6.3. pontban). A kontaktusbontást jelző 3 mm-es piros LED egy kis „H” profilú műanyag hasábjába illeszkedik szorosan (a képen balra), ami összeszereléskor a házon kiképzett horonyba csúszik be. A képen jól látszik a nyomórugó is, a zsákfuratos nyomóelemmel.



20. ábra: Jelkondicionáló áramkör a hátsó pajzsban

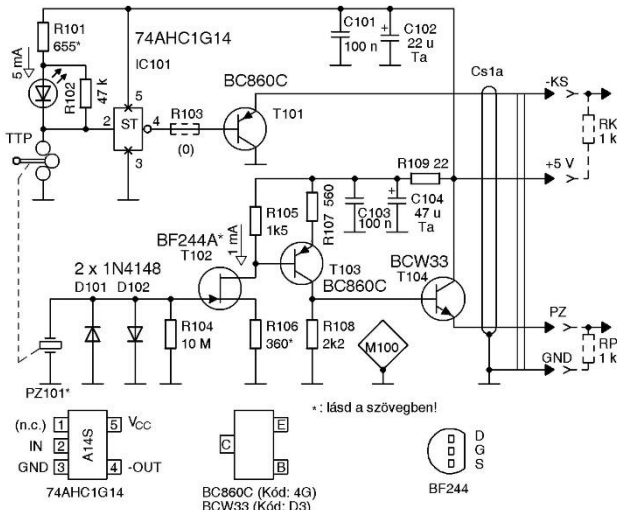
6.2 Jelkondicionáló áramkör

Azon korai szabadalmi leírásokban, amelyek áramköri vázlatokat is közzé tettek, a mérőfejbe integrált elektronika kapcsolási rajzán/tömbvázlatán többnyire megfigyelhető a törekvés, hogy a mérőfej két vezetéken keresztül (amelyből az egyik a test) csatlakozzon a mérőgép elektronikájához, ugyanúgy, mint a legegyszerűbb kinetikus TTP-k. Ezzel pl. a Renishaw TTP-kenél (mint a korábbi TP1, a TP2, a TP6 sorozatnál is) szokásos M8, vagy újabban M16×1 menetű (a TP20 típusnál) felfogás egyetlen központi, elszigetelt érintkezőpárral továbbra is megvalósítható volna. Jellemző példával illusztrálja ezt a törekvést a már hivatkozott US 4769919, amelyben mind a kapcsolórendszer, mind a piezó jeleit a tápfeszültségre szuperponálnák; ilyen megoldást vázol pl. a dokumentum 5. ábrája (**21. ábra**). Mivel ezt a konstrukciós elvet mára maga a Renishaw sem tartja abszolút fontosnak (az SP25M alapmodulon, ha jól számoltam, 13 db aranyozott csatlakozópólus van, ahogyan az a 12. ábrán fölül látszódik), én is eltekintettem tőle. Végül a *Touch-Trigger Probe piezo+* négyvezetékes lett, és egy olcsó, ún. négypólusú mikrofoncsatlakozó-páron (MIC 324/334) keresztül tartja a villamos kapcsolatot a külvilággal. Az 1,5 m-es árnyékolt kábel „összenőtt” a mérőfejvel, ezért az automatikus csere kizárt, de hát egy kísérleti, végül amatőrcélú konstrukciónál ez nem is szempont...



21. ábra: US 4769919 5. ábrája

A szimpla, 5 V-os tápfeszültségről üzemelő áramkör (22. ábra) két független jelfeldolgozó csatornára bontható. A TTP kontaktusrendszerét az R101, LED101, R102 áramkörbe iktatjuk be. Egy „közöséges” anyagokból, azaz 6 db Ø4 csapágygolyóból és 3 db Ø3×12 csapágygörgőből összeállított érintkezőrendszer a tapasztalataim szerint akkor működik megfelelően, ha néhány milliamperes áramot kell megszakítania. Egy átlagos korszerű piros LED ilyen munkapontban már jól világít, miközben mintegy 1,5 V esik rajta. Az R101-gyel kb. 5 mA-es nyugalmi áramot állítottam be. A kontaktus nyugalmi helyzetében az IC101 Schmitt-trigger bemenetét L-re húzza, így a SOT-23/5 tokozású „egykapu” kimenete magas szinten van. A kontaktusbontás során annak átmeneti ellenállása folyamatosan, de igen gyorsan nő (hiszen kinematikus rezisztív mérőfejről van szó), és amikor a rajta eső feszültség eléri a Schmitt-trigger nagyjából 3,5 V-os felső küszöbszintjét, a kimenet L-re vált, majd a kontaktus újbóli záródása során, amikor a feszültség ismét csökken, az áramkör hiszterézise folytán úgy 1,5 V tájéka visszabillen H-ra. Az R102 garantálja a Schmitt-trigger bemenetének korrekt magas szintjét, amikor a TTP szakadást mutat. (Az előfeszítetlen LED nagyon nagy átmeneti ellenállása erre önmagában nem lenne képes.)



22. ábra: A jelkondicionáló áramkör kapcsolási rajza

Az IC101 CMOS kimenete alkalmatlan volna egy 1,5 m hosszúságú, határozatlan impedanciájú kábel meghajtására úgy, hogy a másik végén a jelek fel- és lefutóelei meredeksége ne legyenek elfogadhatatlanul

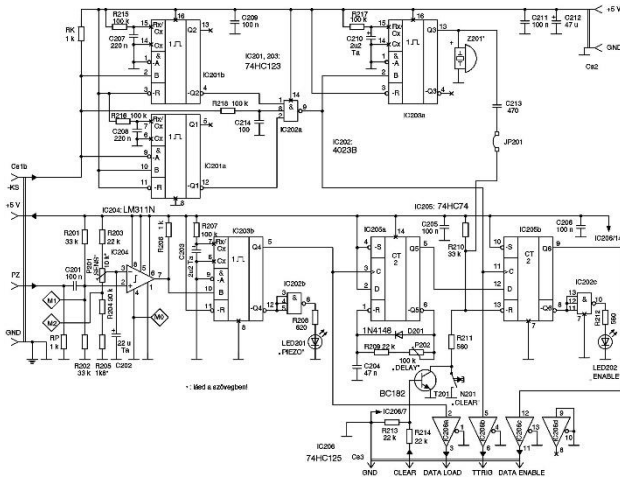
„lankásak”. Ezért iktattuk be a T101 emitterkövetőt, amely a fogadó oldalon az RK, 1 kohmos felhúzóra dolgozik. Nyugalmi állapotban a -KS ponton a feszültség 5 V, ami aktiváláskor +0,7 V-ra csökken, amit a jel-előfeldolgozó áramkör (5.2. pont) CMOS bemenetei alacsony szintként érzékelnek. Az R103 „0 ohmos” ellenállásra csupán nyáktopológiai okból volt szükség. Az R101-et érdemes úgy megválasztani, hogy a LED-en átfolyó áram közel azonos legyen az RK-n átfolyóval, mert így az átkapcsolás során a kapcsolóáramkör összefogyasztása nem ingadozik.

A kapcsolási rajz alsó áramköre egy nagy bemenőimpedanciájú feszültségerősítő, a PZ101 gyorsulásérzékelőhöz illetve a T102 hagyományos, TO-92 tokozású alkatrész, mert ilyen állt rendelkezésre, de ezt is felületre szereltem, a lábait meghajlítása és rövidre vágása után. A FET-es fokozat feszültségerősítése kicsit több mint négyszeres, a T103 közös emitteres fokozat nagyjából kétszeres, míg az emitterkövetős kimenet közel egységnyi. A DC-csatolt erősítőlánc összerősítése így kb. nyolcszoros. A kábel másik végénél a PZ kimenetre csatolt RP ellenálláson jelmentes állapotban mintegy +2,8 V-os nyugalmi DC szint mérhető. A gyorsulásérzékelőn egy-egy erősebb ütés jellegű gerjesztés hatására akár voltos nagyságrendű feszültség is felléphet, ami a FET-et károsíthatná. A D101, D102 antiparalell diódapár ezeket eliminálja. A normál működésre nincsenek hatással, mert olyankor néhány millivoltos - tíz millivoltos jelek keletkeznek. Beállítást csak az R106 igényel: olyan értékűt kell választani, amelynél $U_{PZ} + 2,5 \dots 3$ V közé esik.

Mivel a rendelkezésre álló hely eléggé szűkös volt, a nyákterv kialakításakor sokat „sakkoztam” az alkatrészekkel (20. ábra).

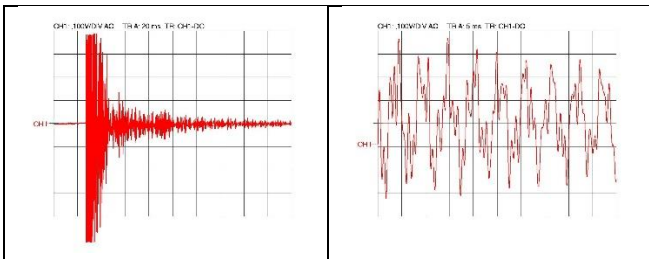
6.3 Jel-előfeldolgozó áramkör

A beépített gyorsulásérzékelő már nagyon kis ütest, rezgést is „észrevesz”. Elég, ha megkocogtatjuk a tapintóházat, vagy akár egy-egy erősebb hanghatás éri a rendszert, máris előállhat a triggerjel. (A nyúlásmérő bélyeges konstrukció előnye éppen az, hogy nem kényes ilyen jellegű zavarokra, ezért lehetett a TTP-kapcsolórendszer kihagyni. Létezik viszont szabadalom a tapintószárba beépített rezgéscsillapításra: US 6370788 B1, bár ilyenrel a valóságban nem találkoztam.) Hogy a környezeti zajtranziensek miatt a piezós TTP-vel való mérés során se keletkezzen hamis adat, a kiértékelő elektronika a piezocella jelkondicionálójáról érkező státuszjel hatására azonnal elmenti ugyan a mérőegységek koordinátaadatait – végül is ez az egész dolog célja –, de csak akkor érvényesíti azokat, ha néhány milliszekundumon belül a golyós/pálcás rendszer kontaktusbontást jelez. Ez így leírva egyszerűnek tűnik, de Murphy általam már többször idézett, konstruktőröknek címzett mondása – „Semelyik műszaki probléma sem olyan egyszerű, mint amilyennek az első pillanatban látszik.” – ezúttal is beigazolódtott: elegendő a 23. ábrára tekinteni, amely a kísérleti jel-előfeldolgozó rendszer teljes kapcsolását mutatja!



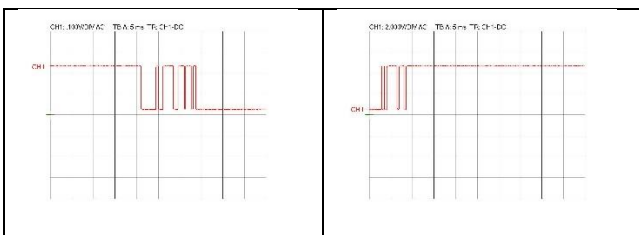
23. ábra: Kísérleti jel-előfeldolgozó rendszer teljes kapcsolása

A fő problémát két jelenség okozza. Az egyik a piezolapkát tartalmazó mechanikai rendszer felépítéséből ered. Ez rugókat, tömeget és csillapításokat tartalmazó mechanikai impedanciát megtestesítő egység, aminek ugyanúgy van sajátfrekvenciája és vannak veszteségei, mint az induktív, kapacitív és rezisztív tagokból álló rezgőkörnek. Az érzékelő az ütésszerű mechanikai gerjesztés hatására csillapodó rezgést végez, amit a **24.a ábrán**, egy részletét kinagyítva a **24.b ábrán** láthatunk (a mérés egy *PZ* ponton történtek). A mechanikai rezgőrendszer sokkal összetettebb annál, mintsem hogy egy egyszerű rezgőkörrel modellezni lehetne: a gerjesztés hatására egyidejűleg több rezgési módus áll elő.



24. ábra: Csillapodó rezgés

A másik kellemetlen jelenséget a TTP kontaktusrendszerének pergése okozza, ami a *-KS* ponton mind a megszakítás közben (**25.a ábra**), mind az alaphelyzetbe történő visszaállítás során (**25.b ábra**) jelentkezik. Ez utóbbi többek között azért különösen kellemetlen, mert a két pergéses jelváltás között meghatározatlan idő telik el pláne abban az esetben, ha kézi mozgatású koordináta-mérőgépen történnek a letapintások.



25. ábra: TTP kontaktusrendszerének pergése

Ha mindkét kimenet összetett jeléből sikerül korrek, egyetlen impulzusból (a *-KS* esetén az impulzus szélessége néhány száz milliszekundumtól akár több másodperc is lehet) álló jelet generálni, akkor az áramkör további fokozatai már nem jelentenek problémát. A korábban hivatkozott EP 0420416 A2 számú szabadalom például komplett kapcsolási vázlatot közöl egy piezóval kiegészített TTP jelfeldolgozására, de a fenti problémákat nagyvonalúan elkerüli: a pergések, lengések megszüntetésére szolgáló áramköri részleteket csupán blokkokként jelöli.

Visszatérve a 23. ábrára: az előfeldolgozás is két csatornán történik. A *-KS* formált kontaktusjelet pergésmentesíteni kell. A hagyományos, RC-tagból és Schmitt-triggerből álló egyszerű áramkörök ide nem alkalmasak, mert milliszekundumos késleltetés engedhető csak meg, miközben a pergés periódusideje eleve néhány milliszekundum. Pergésmentesítőknak a következő kritériumoknak kell eleget tennie:

- az első lefutó impulzusélt minél kisebb késleltetéssel vigye át,
- küszöbölje ki a kontaktusok okozta pergéseket,
- invertálja a kapcsolójelet, mert a pergésmentesítőt követő D-flipflop beírásához $L \rightarrow H$ impulzusél szükséges.

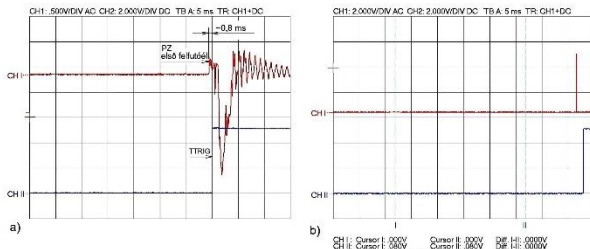
A feladatot két újraindítható monostabilon (IC201) és az IC202a kapun alapuló részlet oldja meg. Nyugalmi állapotban, amikor *-KS* = 1, az IC 201 *-Q1* és *-Q2* kimenete is H szintű, így a kapu kimenete L-en van. A *-KS* első $H \rightarrow L$ váltásakor az IC201a bebillen, és mivel újraindítható és az időzítőelemei sokkal nagyobb kvázistabil időt határoznak meg, mint a pergés periódusideje, *-Q1* mindaddig alacsony szintű marad, amíg a pergés tart. Ugyanez mondható el IC202-ről, csak azt az $L \rightarrow H$ élek billentik be, és a *-Q2* lesz L szintű. Mivel az IC202a kimenete mindaddig H szintű lesz, amíg bármelyik bemenete L-en van, az első lefutó éltől az utolsó felfutóig (+ IC202b kvázistabil idejéig) elvileg egyetlen, folyamatosan magas szintű impulzust kapunk. Hogy ne legyenek benne a monostabilok belső késleltetése miatt „lyukak”, a kapu közvetlen bemenetét az R218, C214 taggal mikroszekundumos nagyságrendben késleltetjük. Ezzel a fenti követelményrendszernek eleget tettünk.

Az IC203a monoflopot a formált impulzus felfutó éle billenti be, és a Z201 aktív piezosugárzót működteti, a TTP-s mérésnél szokásos rövid, kb. 100 ms időtartamú sípólást előállítandó.

A piezocsatorna *PZ* jelét, kapacitív leválasztás (C201) után az IC204, nyitott kollektoros komparátor fogadja, amely az R206 felhőzóra, mint munkaellenállásra dolgozik.

A komparátor referenciaszükségét az R203, P201, R204, R205 feszültségosztó állítja be az invertáló bemenetén. Az R205-öt úgy kell megválasztani, hogy a trimmer leszabályozott állásában a 3. láb potenciálja $0 \pm 0,05$ V legyen a 2. lábéhoz képest. Ekkor a P201-gyel kb. 0...0,8 V-os referenciaszint állítható be. Ha olyan kerámialapkát sikerült megszerezni, amelyik ellentétes polaritású jelet generál, a komparátor két bemenetét egyszerűen cseréljük meg!

A komparátor kimenetén egy 5 V amplitúdójú négyszögbörszt jelenik meg (pontosabban: az alacsony szintje +0,2 V, a magas 5 V), valahányszor a gyorsulásérzékelőt kellő mértékben gerjesztették, azaz a PZ lecsengő amplitúdója egy vagy több perióduson keresztül meghaladja a 100 mV-ra beállított komparálási szintet (**26.a ábra**). Hasonló késleltetést mutat a **26.b ábra**: itt a piros görbe felvétele az IC204 kimenetén történt.



26. ábra: Komparátor kimenete

A rezgéskép meglehetősen sztochasztikus, így a komparátor kimenetével egy eléggé nagy, mintegy 100 ms kvázistabil idejű, újraindítható monoflopot (IC203b) triggerelünk. A monoflop Q4 kimenetén már egyetlen impulzust kapunk, aminek a felfutó éle nagyon kis késleltetéssel a börszt első élénél áll elő. A monostabil bebillent állapotát az IC202b által meghajtott LED201 jelzi a felhasználónak. A végső soron PZ első felfutó éle által kiváltott DATA LOAD (adatbeíró) jelet az IC206a vonalmeghajtó küldi ki a mérőgép vezérlőegységének.

Kapcsolási vázlatunk alapját az IC205 képezi, mert ez valósítja meg a jelzésel fogadás alapelvét: a piezóz csatorna parancsára elmentett adatot csak akkor érvényesíti, ha a kontaktuscsatorna egy megadott időablakon belül aktiválódik. A működése elve azonos az [1] jel-előfeldolgozó áramkörében szereplő hasonló részlethez, csupán a tényleges kapcsolás tér el attól. Mivel ebbe a fokozatba nem kell újraindítható monoflop, egy szokatlan, ritkán használatos monostabilt alakítottam ki az IC205a D-flipflopból. Ez a C bemenetén billen be, az impulzus L→H élénél. Ekkor a D bemenet stabil H szintje íródik be a regiszterébe, a -Q5 L-re vált. A D201-en át előzőleg gyorsan a tápfeszültség közelébe feltöltött C204 elkezd küldeni az R209, P202 soros tagon át. Amint a kondenzátor feszültsége elérte a -R bemenet küszöbszintjét, a tároló resetelődik. Közben a Q5 kimeneten a P202 állásától függően egy kb. 0,8...4 ms szélességű impulzus keletkezik: ez az említett időablak. Az impulzust a D bemenetre vezetjük.

Amennyiben ezen időtartam alatt a C bemenetre megérkezik a formált kapcsolóimpulzus felfutó éle, az IC205b-be H szint íródik, ellenkező esetben a Q6 alacsony szinten marad. A Q6 magas szintje engedélyezi a DATA LOAD által előzőleg elmentett adatok (azaz az X, Y, Z koordinátaértékek) mérési adatként való elfogadását a koordináta-mérőgép vezérlése számára. A DATA ENABLE jelet az IC206c küldi ki, közben az IC202c-n keresztül aktiválódik a D202 LED.

Az IC205b-t az adat elfogadása után alaphelyzetbe kell állítani. Ezt maga a jel-előfeldolgozó egységünk is meg tudja tenni, ha a JP201-et felhelyezzük. Ilyenkor az IC203a Q kimenetének a „sípszó” végén, tehát a kontaktusbontás után nagyjából 0,1 s-mal végbemenő L-re váltása a C213-on át törli az IC205b-t. Külső resetre is

lehetőség van: a mérőgép vezérlése a CLEAR impulzussal törölhet, a T201 segítségével, de a felhasználó is megnyomhatja az N201 gombot. (Utóbbi az áramköri kísérletek során volt különösen hasznos.)

A TTRIG jelet olyan lassú megközelítés esetén használja fel a mérőgép vezérlése, amikor a PZ kimeneti impulzusai nem érik el komparátor küszöbszintjét, de végül az érintés megtörtént.

Az áramkört csak dugaszpanelon raktam össze, hogy a beállítási adatokat kikísérletezhessenem, nyáktervet nem készítettem hozzá. A végleges rendszer mikrokontroller alapú, természeténél fogva a bemutatottnál sokkal egyszerűbb kapcsolású [18]. A kellő reagálási sebesség a kontrollerchipe integrált CLC-knek (Configurable Logical Cell) köszönhető.

A két trimmer beállítása különös odafigyelést igényel. A P1-el olyan érzékenységre kell venni a piezorendszert, hogy ne okozzon sűrűn „vakriasztást”. Ez a tapasztalataim szerint minimum +50 mV-os komparálási szintet jelent. A P2-vel a várakozási időt úgy kell beállítani, hogy a 26.b ábra szerint az első felfutó impulzusél még beleférjen, de a második már ne. A beállítások erősen függenek a konkrét mérőfej alkatrészeinek méreteitől, felerősítésének módjától, környezetétől.

7 KÉT KURIÓZUM

Végezetül két nagyon érdekes honlapra hívom fel a TTP-k iránt érdeklődő kedves olvasó figyelmét. A [19] részletes tanulmány ismerteti a jelen cikkben is szereplő gyári tapintókat, majd bemutat több, *mágneses érzékelőkön* alapuló saját, nagyon érzékeny konstrukciót. A tapintószár ezekben rugómembrános tájolású. A saját tervezésű rugómembránok számos változatát szemlélteti, és mind ezeknek, mind a mágneses érzékelőrendszereknek, mind az elkészült tapintófejek hibáinak komoly matematikai analizisét adja.

A [20] egy Michelson-interferométeren alapuló kísérleti mérőfejről számol be, amelynek fő optikai egységét CD-meghajító olvasófejből képezték ki. A miniatűr tapintófejet különleges szálak tájolják, a mozgó egységben öt apró síktükör is van.

Tág tere nyílik a kísérletezésnek, ezen a területen is!

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] <http://www.cnczone.nl/viewtopic.php?f=22&t=4157&hilit=touchprobe>
- [2] <https://patentimages.storage.googleapis.com/28/24/cb/814a38d5bc648e/US4153998.pdf>
- [3] Pálinkás Tibor: Érintkezőstátusz induktív átvitele; Rádiótechnika 2009/11., p. 638-639.
- [4] Renishaw: TE411 Innovations in touch-trigger probe sensor technology
- [5] Woźniak, A., & Dobosz, M. (2003). Metrological feasibilities of CMM touch trigger probes. Part I: 3D theoretical model of probe pretravel. *Measurement*, 34(4), 273-286.
- [6] <http://www.practicalmachinist.com/vb/cnc-machining/anyone-been-inside-renishaw-probe-246715/>
- [7] <http://www.measurement.sk/2013/Wozniak.pdf>
- [8] Pálinkás Tibor: A precíziós érintkezőpár; Rádiótechnika 2017/10., p. 334.
- [9] Katona Zoltán: A Rádiótechnika fejtörő versenye; Rádiótechnika 1967/2., B3
- [10] Pálinkás Tibor: Kontaktusolaj; Rádiótechnika 2012/9., p. 410.
- [11] <http://gtocs.blogspot.hu/2012/04/garys-diy-cnc-touch-probe.html>

- [12] <http://www.renishaw.com/en/rengage-technology--13953>
- [13] Pálinkás Tibor: Érintkezős tapintófej, infravörös státuszátvitellel; *Rádiótechnika* 2016/1., pp. 6-8; 2016/2., pp. 43-46; 2016/3., 92-94.
- [14] Renishaw: H-2000-8309 High-accuracy machine tool probes with RENGAGE technology
- [15] Pálinkás Tibor: Optoelektronikai TTP; *Rádiótechnika Évkönyve* 2019, pp. 138-157.
- [16] <https://www.nikonmetrology.com/Download/Touch-probe>
- [17] Pálinkás Tibor: Kondenzátor-hegesztés (gyakorlati példa); *Rádiótechnika* 2016/3., p. 88., 89.
- [18] Kőnig Imre: A TTP Piezo+ és az áruhás hardver; *Rádiótechnika* 2017/2., p. 54, 55; 2017/3., pp. 83-85.
- [19] <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12609112/index.pdf>
- [20] Li, R. J., Fan, K. C., Tao, S., Qian, J. Z., Huang, Q. X., & Cheng, F. (2011, November). Design of an analogue contact probe for nano-coordinate measurement machines (CMM). In *Seventh International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation* (Vol. 8321, pp. 286-293). SPIE.

Körök mérésének befolyásoló tényezői profilprojektorral történő méréseknél

Factors influencing the measurement of circles in profile projector measurements

Marczis Attila, Drégelyi-Kiss Ágota

* Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Kar, Gyártástechnológiai Intézeti Tanszék,
Budapest, Magyarország

marczis.attila@phd.uni-obuda.hu, dregelyi.agota@bgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás — Az iparban a koordináta-méréstechnikai feladatokat a legkülönbözőbb módszereket alkalmazó berendezésekkel hajtják végre. Az egyik legáltalánosabban használt eszköz a profilprojektor, melynek a mérési bizonytalanságában több tényező játszik szerepet. Ezeknek a tényezőknek az ismerete elengedhetetlen a pontos és visszavezetett mérések esetében. A koordinátaméréstechnikában a mért pontokra ideális, 2 vagy 3 dimenziós geometriai alakzatokat illesztünk, melyeknek a vizsgálatával kaphatunk mérési eredményeket a vizsgálati darabról. Az alakzatok illesztését a mért pontokra többféle módszerrel lehet elvégezni. A cikkben egy Mitutoyo PJ-H3000F profilprojektorral történő köralakzat-mérésnél felmerülő befolyásoló tényezőket határozzuk meg. A cikkben összefüggéseket keresünk a mérési pontszám, a mért átmérő és a mérési hiba között.

Kulcsszavak: profilprojektor, metrológia, illesztési módszer, koordináta-méréstechnika

Abstract — Industry uses a variety of devices to measure dimensions. Profile projectors are widely employed in metrology, and numerous factors affect measurement uncertainty. These elements must be understood for precise and traceable measurements. In co-ordinate metrology, ideal 2 or 3 dimensional geometric shapes are fitted against measured points to determine actual measurement results. Several approaches can fit geometric shapes to measured points. We determine the elements that affect Mitutoyo PJ-H3000F profile projector measurements of circular forms in this study. The paper examines connections between the number of the measurement points, diameter, and measurement error.

Keywords: profile projector, metrology, fitting method, coordinate measuring

1 BEVEZETÉS

A profilprojektorok, vagy másképp nevezve optikai összehasonlító berendezések, sokoldalú eszközök melyet a világ minden táján alkalmaznak a mérés technikában. A berendezés alapkonceptiója, hogy egy nagyított árnyékképet vetít a munkadarabról egy vetítőernyőre, amin a méréseket elvégezhetjük. A munkadarab egy precíz asztalon helyezkedik el, amivel a fénysugárban lehet mozgatni, tehát a mérési pont a referencia pontra

mozgatható (szálkereszt). A pozíciót az asztal útmérő rendszeréről olvashatjuk le [1].

Az első optikai projektorokat röviddel az első világháború után fejlesztették ki azzal a szándékkal, hogy ellenőrizzék a menetkészítő szerszámok élének alakját. Mindamellett az első projektoroknak sok hátránya volt, például sötét szoba kellett az alkalmazásukhoz, hogy a kép látható legyen. A vetítőernyő túl messze volt a kezelőtől a megfelelő összehasonlításhoz, az árnyékkép és a mesterdarab között. Ezért beépítettek egy tükröt a vetített kép útjába, hogy a képet egy olyan vetítőernyőre irányítsa, ami a kezelő előtt van. Ezt az egészet behelyezték egy házba, ami által nem volt szükség a későbbiekben sötét szobára [1].

Bár a fő felhasználói az optikai projektoroknak a menetvágó szerszámok és magas minőségű menetes alkatrészek gyártói voltak, az alkalmazhatósága az új optikai mérőeszközöknek nem sokáig fókuszálódott erre a szűk területre. Az optikai projektor, mint sokoldalú, megbízható mérőeszköz hamar széles körben elterjedt az iparban [1].

Elsődleges célja a profilprojektor, hogy egy torzításmentes nagyított árnyékképet vetítsünk a vetítőernyőre, ahol kényelmesen vizsgálható. Ahhoz, hogy ezt elérjük a következő alapelemekre van szükség:

- A fényforrás, aminek erősnek kell lennie, hogy nagyobb nagyításokon is éles projekciót kapjunk.
- A párhuzamosító lencse, aminek a szerepe, hogy úgy törje meg a fényt, hogy egy olyan fénynyalábot alkosson, ami párhuzamos fénysugarakból áll és a vizsgált területen a fényerőssége egyenlő.
- A vetítő lencserendszer, ami nagyítja és továbbítja a munkadarab kontúrját vagy a képet, ami a párhuzamosított fénysugarak által keletkezik.
- A vetítőernyő, amin a vetített kontúr vagy kép megjelenik és ezáltal vizsgálhatóvá válik.
- A cikkben ismertetett vizsgálat célja, hogy a körök mérésének a befolyásoló tényezőit meghatározzam profilprojektorral történő mérések esetén.

2 ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1 Köralakúság meghatározásának módszerei

A köralakúság definíciója ISO 1101:1017 [2] szerint: egy tűrt átmérő esetén a munkadarab a köralakúságnak megfelel, ha az adott keresztmetszet külső pontjai két koncentrikus kör között úgy helyezkednek el, hogy a két kör közötti sugár irányú különbség egyenlő vagy kisebb a megadott tűrés értékénél. A koncentrikus körök középpontját és a sugarukat úgy kell megválasztani, hogy a sugár irányú különbségük a legkisebb legyen.

Egy mért ponthalmazra matematikai módszerek segítségével többféle kört lehet illeszteni. A mérés technikában leggyakrabban használt illesztési módszerek:

- Legkisebb négyzetes eltérések módszere (LSC, *least square circle*, Gauss-kör)
- Legkisebb köré írható kör (MCC, *minimum circumscribed circle*)
- Legnagyobb beleírható kör (MIC, *maximum inscribed circle*)
- Minimum zóna módszer (MZC, *minimum zone circle*)

A fejezet további részében a fent említett négy módszer kerül ismertetésre matematikai szempontból. A módszerek áttekintése során a legnagyobb hangsúlyt a legkisebb négyzetes eltérések módszere kapja, mivel ez a módszer a legelterjedtebb. A legkisebb köré írható és a legnagyobb beleírható kört akkor használják, ha technológiai szükségessége van (pl. illesztéseknél).

2.1.1 Legkisebb négyzetes eltérések módszere geometriai megközelítéssel (LSC)

A Legkisebb négyzetes eltérések módszere az átlagos négyzetes távolság minimalizálásán alapszik, az illesztett kör és a mért pontok között sugárirányban. Adott n pont (x_i, y_i) , $1 \leq i \leq n$, eszerint a célfüggvény definiálható:

$$\mathcal{F} = \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (1)$$

ahol: d_i : az euklidészi (geometriai) távolság a pont (x_i, y_i) és az illesztett kör között sugárirányban. Kör illesztésénél a következő egyenletet írhatjuk fel:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2 \quad (2)$$

ahol (a, b) a kör középpontjának koordinátái és R a kör sugara. Ezután felírhatjuk a távolságokat:

$$d_i = r_i - R \quad (3)$$

ahol: r_i : az illesztett kör középpontjától a távolság a mért pontig:

$$r_i = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} \quad (4)$$

(4)-t behelyettesítve (3)-ba:

$$d_i = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - R \quad (5)$$

Ez a módszer a legáltalánosabb körillesztési módszer, azonban nincs közvetlen algoritmus a legkisebb négyzetes eltérések körillesztésére. (1) minimalizálása nemlineáris probléma, aminek nincs zárt formulás megoldása, ezért az összes ismert algoritmus iteratív [3], [4], [5], [6].

Hogy biztosítsuk a momentumok létezését bevezethetünk egy új paramétersémát. Egy elegáns módra tett javaslatot Pratt [7], amely egy egyenlet formájában írja le a kört:

$$A(x^2 + y^2) + Bx + Cy + D = 0 \quad (6)$$

Ahol: A, B, C, D : változók,

x, y : a pont koordinátái.

Egy nyilvánvaló kitételnek teljesülnie kell: $A \neq 0$ (különben ez az egyenlet egy egyenest írna le) és egy másik kitételnek is teljesülnie kell: $B^2 + C^2 - 4AD > 0$. Az utóbbi kitétel jobban észrevehetjük, ha másképp írjuk fel az egyenletet:

$$\left(x - \frac{B}{2A}\right)^2 + \left(y - \frac{C}{2A}\right)^2 - \frac{B^2 + C^2 - 4AD}{4A^2} = 0 \quad (7)$$

Egyértelműen látható, hogy (6) csak akkor ír le egy kört, ha $B^2 + C^2 - 4AD > 0$ [3].

Az előzőekből következik, hogy a paramétereket (A, B, C, D) egy skaláris számmal kell meghatározunk, ebből természetes módon adódik a kikötés:

$$B^2 + C^2 - 4AD = 1 \quad (8)$$

(8) automatikusan biztosítja, hogy $B^2 + C^2 - 4AD > 0$. A (6) kikötés javaslatával először Pratt [7] állt elő [3].

A (6) egyenlet a (8) kikötéssel megfelelően leírja az összes kört és egyenest (az utóbbit akkor, ha $A=0$). Miután előállítottuk az algebrai kör paramétereit (A, B, C, D) , át tudjuk konvertálni őket a természetes paraméterekbe:

$$a = -\frac{B}{2A}, \quad b = -\frac{C}{2A}, \quad R^2 = \frac{B^2 + C^2 - 4AD}{4A^2} \quad (9)$$

ahol: (a, b) : az illesztett kör középpontjának koordinátái
 R : az illesztett kör sugara [3].

2.1.2 Legkisebb négyzetes eltérések módszere algebrai megközelítéssel (LSC)

Alternatívák a bonyolult geometriai illesztésekre a nem iteratív módszerek, az algebrai körillesztések. Az algebrai módszerek előnye, hogy ezeknél zárt formulás egyenletekkel lehet meghatározni a legjobban illeszkedő kört a ponthalmazra, de egy kis hibát mindegyik tartalmaz, tehát csak közelíti a legkisebb négyzetes eltérések módszerével előállított kört. A legkisebb négyzetes eltérések módszerénél mindig kell egy kezdeti becslést adnunk a kör középpontjára és sugarára, ahonnan az iteratív geometriai algoritmus kiindulhat. Minél pontosabb a kezdeti becslésünk, annál kisebb az esély, hogy az iterációk során a minimalizálandó függvény egy lokális minimumát találjuk meg. Az alábbiakban a leggyakrabban használt 3 algebrai módszert ismertetem.

A Kasa illesztési módszer a következő függvény minimalizálásával találja meg a legjobban illeszkedő kört:

$$\mathcal{F}_K = \sum_{i=1}^n (r_i^2 - R^2)^2 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 - 2ax_i - 2by_i + a^2 + b^2 - R^2)^2 \quad (10)$$

ahol: (x_i, y_i) : a mért pontok koordinátái;
 (a, b) : az illesztett kör középpontjának koordinátái;
 R : az illesztett kör sugara;
 r_i : az illesztett kör középpontjától a távolság a mért pontig.

Másképp felírva a függvényt:

$$\mathcal{F}_K = \sum_{i=1}^n f_i^2 \quad (11)$$

ahol: $f_i = r_i^2 - R^2$, ami az úgynevezett algebrai távolság a pont (x_i, y_i) és az illesztett kör között.

Ha a paramétereket átírjuk: $B = -2a, C = -2b, D = a^2 + b^2 - R^2$, akkor (6) a következők szerint módosul:

$$\mathcal{F}_K = \sum_{i=1}^n (z_i + Bx_i + Cy_i + D)^2 \quad (12)$$

ahol: $z_i = x_i^2 + y_i^2$.

Szándékosan hagytuk el a jelölésből az A -t, hogy a soron következő módszer ismertetésénél megmaradjon a következtetés. Az újonnan létrejött egyenlet már lineáris egyenletrendszer eredményez B, C, D -nek köszönhetően [3] [6].

A Kasa illesztés talán a leggyorsabb algoritmus, de pontatlan, ha a kör mentén a pontok nem folytonosan vannak felvéve (csak a körnek egy szakaszán), illetve kis körök esetén. Az eltérés oka, hogy az algebrai távolságok f_i rosszul közelítik a geometriai távolságokat d_i , tulajdonképpen:

$$f_i = (r_i - R)(r_i + R) = d_i(2R + d_i) \approx 2Rd_i \quad (13)$$

ennek következtében az algoritmus az $\mathcal{F}_K \approx 2R^2 \sum d_i^2$ függvényt minimalizálja. Ez gyakran okozza azt, hogy kis köröknél az algoritmus R^2 -et minimalizálja a geometriai távolságok d_i helyett [3] [6].

A Kasa módszer teljesítményének növelése érdekében a Kasa módszer függvényét kiegészítették egy taggal (Pratt módszer) és így: $\mathcal{F} = \frac{1}{4R^2} \mathcal{F}_K$ függvényt minimalizálják. Ez a függvény jobb közelítést ad a geometriai távolságokra, azaz: $\sum d_i^2$ -re. Az új egyenlet A, B, C, D tagokkal kifejezve (9) szerint:

$$\mathcal{F}_P = \sum \frac{[Az_i + Bx_i + Cy_i + D]^2}{B^2 + C^2 - 4AD} \quad (14)$$

(8) kikötéssel lehet egyszerűsíteni a függvényt [3] [7]:

$$\mathcal{F}_P(A, B, C, D) = \sum [Az_i + Bx_i + Cy_i + D]^2 \quad (15)$$

Egy kicsit eltérő módszert közölt Taubin [3], aki a következő egyenletet minimalizálta:

$$\mathcal{F}_T = \frac{\sum [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2]^2}{4n^{-1} \sum [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2]} \quad (16)$$

A, B, C, D változókkal kifejezve (9) szerint:

$$\mathcal{F}_T = \sum \frac{[Az_i + Bx_i + Cy_i + D]^2}{4n^{-1} \sum [4A^2z_i + 4ABx_i + 4ACy_i + B^2 + C^2]} \quad (17)$$

Ha teszünk egy kikötést:

$$4A^2\bar{z} + 4AB\bar{x} + 4AC\bar{y} + B^2 + C^2 = 1 \quad (18)$$

ahol: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$, stb.,

akkor tulajdonképpen megkapjuk (15) egyenletet.

Általános megjegyzések: (15) minimalizálásához kell tennünk néhány kikötést, hogy elkerüljük a triviális megoldást: $A=B=C=D=0$. Pratt (8) kikötést használja, Taubin (18) kikötést. A Kasa illesztési módszer ugyancsak (15) egyenletet minimalizálja, de $A=1$ kikötéssel [3].

2.1.3 A legkisebb köréírható kör (MCC)

A legkisebb köré írható kör problémája matematikailag leírva:

$$\begin{cases} \min r_L \\ (x_{0L} - x_i)^2 + (y_{0L} - y_i)^2 \leq r_L^2, \quad i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (19)$$

ahol: r_L : az illesztett kör sugara,

$x_{0L}; y_{0L}$: az illesztett kör középpontjának koordinátái,

$x_i; y_i$: a mért pontok koordinátái.

A mért pontoknak a körön belül kell elhelyezkedniük, úgy hogy a kör sugara a lehető legkisebb legyen. Ezt a kört különböző iterációs módszerekkel lehet meghatározni. Nem létezik algebrai közelítése a problémának, mint a legkisebb négyzetek módszerének [8].

2.1.4 A legnagyobb beleírható kör (MIC)

A legnagyobb bele írható kör problémája matematikailag leírva:

$$\begin{cases} \max r_B \\ (x_{0B} - x_i)^2 + (y_{0B} - y_i)^2 \leq r_B^2, \quad i = 1, \dots, n \\ (x_{0B}, y_{0B}) \in \text{Conv}\{x_i, y_i\}, \quad i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (20)$$

ahol: r_B : az illesztett kör sugara,

$x_{0B}; y_{0B}$: az illesztett kör középpontjának koordinátái,

$x_i; y_i$: a mért pontok koordinátái,

Conv : a legkisebb konvex burkoló elem, ami magában foglalja az összes $x_i; y_i$ pontot.

Az összes pont az illesztett körön kívül kell elhelyezkednie, úgy hogy közben az illesztett kör sugara a lehető legnagyobb legyen és a kör középpontja a ponthalmazra illeszthető legkisebb konvex burkolóelemen belül helyezkedjen el [8].

2.1.5 A minimum zóna kör (MZC)

A minimum zóna módszer matematikai problémája a következőképpen írható le:

$$\begin{cases} \min(r_{max} - r_{min}) \\ r_{min}^2 \leq (x_{0z} - x_i)^2 + (y_{0z} - y_i)^2 \leq r_{max}^2, \\ i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (21)$$

ahol: $(r_{max} - r_{min})$: a két koncentrikus kör sugarának különbsége

$x_{0z}; y_{0z}$: az illesztett körök középpontjának koordinátái,

$x_i; y_i$: a mért pontok koordinátái.

Ez a módszer két koncentrikus kör sugár irányú különbségét minimalizálja. A kisebbik kör a ponthalmazon belül helyezkedik el, mindegyik pont a körön kívül helyezkedik el. A nagyobbik kör az összes pontot tartalmazza [2], [8], [9].

A köralakúság definíciójának ezzel a módszerrel meghatározott köralakúsági hiba felel meg a leginkább, ezért abban az esetben, amikor nem az illesztések az elsődlegesek, akkor ezt a becslést javasolt használni.

2.2 Kalibrálógyűrűk

A kalibrálógyűrűket általában mérőeszközök ellenőrzésére, beállítására és nullpont felvételre használják. A gyűrűk idomszeracélból készülnek, edzve, feszültségmentesítve, köszörülve és leppelve vannak. A pontos méretük rá van írva, azzal a hőmérséklettel együtt, amin tartják a ráírt méretet. A mérendő munkadarabok megválasztásánál fontos szempont volt, hogy az alakhiba minimális legyen, vagyis ne növelje a mérés bizonytalanságát túlságosan. Fontos megemlíteni, hogy a kalibrálógyűrűk élettörése nagyon kicsi, ezért profilprojektorral történő mérés során rá lehet fókuszálni a felső élre. A következő névleges furatméretű kalibrálógyűrűket használtam a mérés során:

- Ø6^{+0,012} mm.
- Ø12,0000 mm.
- Ø25^{+0,001} mm.
- Ø60_{-0,001} mm.
- Ø100_{-0,001} mm.

2.3 A referenciamérésekhez használt mérőgépek

Zeiss ULM450 univerzális hossz mérőgép

Adatok:

- Felbontóképesség: 1 µm
- Mikrométerorsó osztásértéke: 0,01 mm
- A készülék szórása: ±0,15 µm
- Mérési bizonytalanság mérőlámpás méréseknél és belső méreteknél (Uc):

$$\pm(2 + L/100) \mu m \quad (22)$$

ahol L a mérőszám a mérési hosszra mm-ben. Egy léptékvonás használata esetén, mérőlámpás és különbségméréseknél a bizonytalanság csak 1 µm.

- Mérési tartomány furatméresnél: 1-50 mm-ig.
- A gép méretei: 890 mm, 350 mm, 500 mm (hossz, mélység, magasság).
- Az asztal adatai:
- Mérete: 160 mm x 160 mm.
- A magassága 0-tól 105 mm-ig állítható.
- Y irányban 0-tól 25 mm-ig állítható.
- A gép hossz tengelye körüli dönthetősége: ±3°.
- A hossz tengelyre merőleges tengely körüli dönthetősége: ±4°.

Zeiss egytetemes mérőmikroszkóp

Adatok:

- Felbontóképesség: 1 µm
- Mikrométerorsó osztásértéke: 0,01 mm
- A készülék szórása: ±0,15 µm
- Az asztal méretei: 260 mm x 270 mm
- A mérési bizonytalanság érintés nélküli (mikroszkópos) mérésnél:

$$\pm \left(3,5 \frac{L}{130} + \frac{H \cdot L}{4000} \right) \mu m \quad (23)$$

ahol: H: a mérési sík magassága az asztal síkjától mm-ben,
L: mérőszám a mérési hosszra mm-ben.

2.4 A profilprojektoros mérések

A vizsgálathoz egy Mitutoyo PJ-H3000F típusú profilprojektort használtunk, melynek a jellemzői:

- Felbontóképesség X és Y irányban: 1 µm
- Az asztal méretei: 200 mm x 100 mm
- A mérési bizonytalanság:

$$\left(3 + \frac{L}{50} \right) \mu m \quad (24)$$

ahol: L: mérési hossz mm-ben.

Nagyítás: 10x, 50x.

A méréseket a mérési pontszám szisztematikus változtatásával végeztük a különböző átmérőjű kalibrálógyűrűkön. A mérési pontokat a furat kerülete mentén nagyjából egyenlő távolságokra vettük fel. Hosszabb mérési szünetekben a profilprojektor világítását lekapcsoltuk, hogy minél kisebb mértékben befolyásolja a lámpa hője a gyűrűk méretét.

Az öt különböző átmérőre 3, 5, 7, 9 és 15 pontot vettünk fel és minden mérést háromszor végeztünk el, ez összesen 585 mérési pontot jelent:

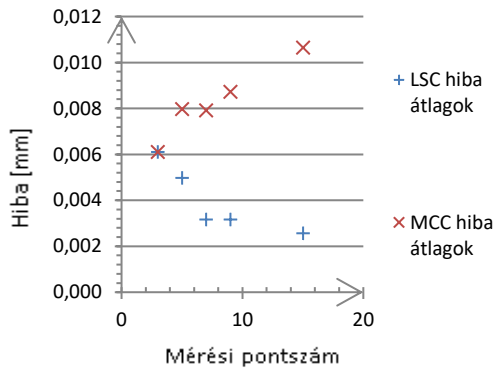
$$[(3 + 5 + 7 + 9 + 15) \cdot 5] \cdot 3 = 585 \text{ pont} \quad (25)$$

A mérési pontokra a körillesztéseket a Matlab program segítségével végeztük. A kísérlet során használt illesztési Matlab programok interneten elérhetők. A program bemenete a pontok X és Y koordinátái, kimenete pedig az illesztett kör középpontjának X és Y koordinátái és a kör sugara.

3 EREDMÉNYEK ÉS STATISZTIKAI ELEMZÉS

3.1 LSC és MCC körök

A mérési hiba a mért értékek és a helyes érték különbségét jelenti. Kiszámítottuk az egyes kalibrálógyűrűk esetén a mérési hibákat, majd képeztük ezeknek a mérési hibáknak az átlagait a mérési pontszámok szerint az összes vizsgálatba vont kalibrálógyűrű esetén. Az 1. ábrán mérési hibák átlaga látható a pontszámok függvényében. A diagramon egy pont a 6, 12, 25, 60 és 100 mm-es kalibráló gyűrűkre felvett pontokra illesztett LSC vagy MCC körök eltérésének az átlagát jelenti. Jól látható, hogy a mérési pontszám növekedésével az LSC körök eltérése a tényleges értéktől csökken, tehát minél több pontot veszünk fel a kerület mentén, annál pontosabb lesz az illesztett kör átmérője. Az MCC körök esetén fordított tendenciát láthatunk, minél több pontot veszünk fel a kerület mentén, annál nagyobb lesz a körök hibája.



1. ábra: A mérési hibák értékeinek átlaga a mérési pontszám függvényében

A 2. ábrán szintén az eltérések átlaga látható, de az átmérők függvényében. A diagramon egy pont a 3, 5, 7, 9 és 15 pontra illesztett körök eltérésének átlagát jelöli a referenciaátmérőhöz. Az adatokra hatványfüggvény illeszthető jó közelítéssel.

Az LSC körök hibáját az átmérő függvényében a következő egyenlettel írhatjuk le:

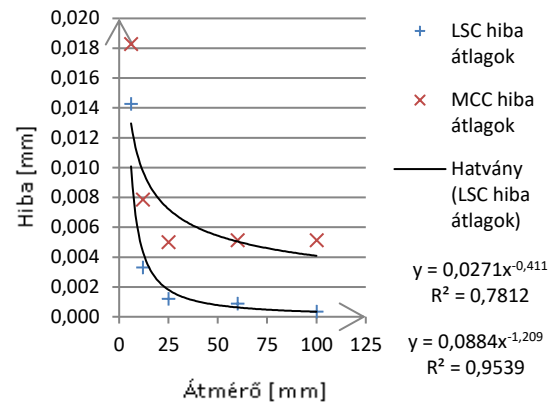
$$\text{Mérési hiba (LSC)} = 0,0884 \cdot d^{-1,209} \quad (26)$$

ahol d : a mért átmérő értéke mm-ben.

Az MCC körök hibáját az átmérő függvényében a következő egyenlettel lehet közelíteni:

$$\text{Mérési hiba (MCC)} = 0,0271 \cdot d^{-0,411} \quad (27)$$

ahol d : a mért átmérő értéke mm-ben.



2. ábra: A mérési hibák átlaga az átmérők függvényében

A függvénykapcsolatokból látható, hogy mindkét matematikai számítási módszer esetén a 25 mm-es átmérőnél nagyobb méretű idomszerek esetén a mérési hiba értéke állandósul. Ebből arra lehet következtetni, hogy a 25 mm-nél kisebb körök átmérőjének meghatározása során a mérési hiba (a mérés torzítása) jelentősen befolyásolja a mérési eredményt. Az befolyásolhatja a mérést, hogy a profilprojektor vetítőernyőjén a szálereszttel azonos nagytás mellett a különböző átmérők esetén változó görbületű kontúrra kell ráállni, illetve a szálereszt vastagsága állandó, a mért átmérők értéke viszont változó.

3.2 ANOVA (szórásanalízis)

Az összes mérési hibát kiszámítottuk, és szórásanalízissel megvizsgáltuk, hogy a mérési pontszámok változtatása vagy a különféle méretű kalibrálógyűrűk szignifikánsan különböző eredményeket adnak-e.

A vizsgálati modell a következő egyenlettel írható le:

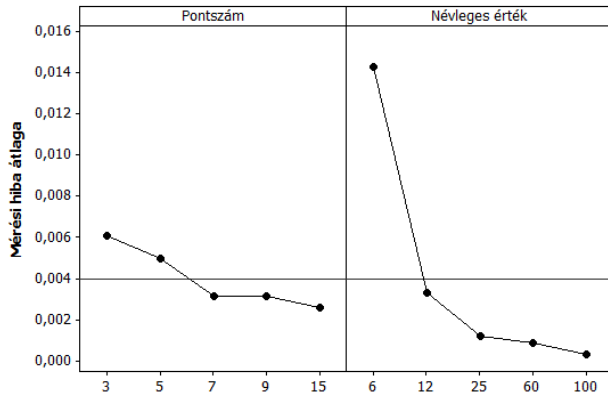
$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{jk} \quad (28)$$

ahol: y_{ijk} : k-dik mért adat,
 μ : a várható érték,
 α_i : i-dik pontszám,
 β_j : j-dik gyűrű méret,
 ε_{ijk} : a kísérleti hiba.

A szórásanalízis megmutatta, hogy a kalibráló gyűrűk méretének 95%-os szignifikancia szinten hatása van a mérési hiba értékére, vagyis nem elhanyagolható, melyik gyűrűt mérjük, mert a mérési hiba mértéke változik. A mérési pontszámnak nincs hatása a mérési hiba értékére 95%-os szinten ($p > 0,05$).

A főhatásra (3. ábra) megmutatja, hogy átlagosan a mérési hibát hogyan befolyásolja a mérési pontszám és a kalibráló gyűrű mérete. Látható, hogy a mérési pontszám növekedésével csökkenés van a mérési hiba átlagos értékében az összes vizsgált esetet figyelembe véve, de ez nem szignifikáns mértékű összefüggés, illetve a gyűrűk méretének növekedése okozta hatással.

A faktorok (mérési pontszám és kalibráló gyűrű mérete) között nem mutatható ki kölcsönhatás.



3. ábra: Főhatásábra

3.3 Szórásanalízis az egyes kalibrálógyűrűkre

Vizsgálatunk során a profilprojektossal történő ismételt mérések ingadozását határozzuk meg a továbbiakban. Ez esetben minden gyűrű esetén külön meghatározzuk az ismételt mérések szórását az adott gyűrűhöz tartozó összes mérés figyelembevételével. A vizsgálat során használt vizsgálati modellt a következő egyenlet írja le:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad (29)$$

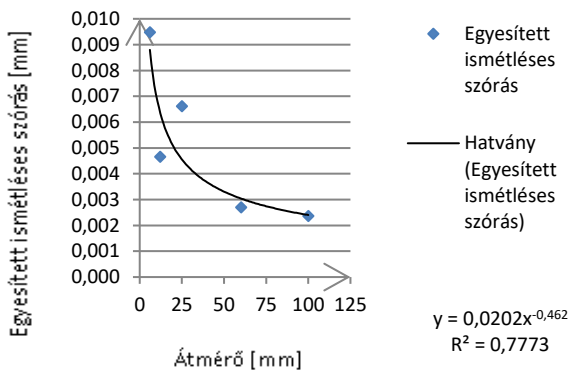
ahol: y_{ij} : k-dik mért adat,

μ : a várható érték,

α_i : i-dik pontszám,

ε_{ij} : a ismétléses hiba.

Minden kalibrálógyűrű mért értékére végeztünk egy faktoros, a mérési pontszám és az átmérő szerinti szórásanalízist, és meghatároztuk az adott kalibrálógyűrűhöz tartozó egyesített ismétléses szórás értékét. Az eredmények azt mutatták, hogy a mérési pontszámnak nincs hatása a mérési hiba értékére 95%-os szignifikancia szinten.



4. ábra: Az egyesített ismétléses szórások az átmérő függvényében

Az ismétléses szórások az átmérő függvényében az 4. ábrán láthatók. A diagramon látható, hogy minél nagyobb a vizsgált átmérő, az ismétléses szórás annál kisebb. Ennek oka az lehet, hogy a profilprojektor nagyítási értékének

beállítása mellett változó átmérők mérése esetén a szálkereszttel változó görbületű kontúrra kell ráállni. Tehát minél nagyobb a vizsgált átmérő, annál kisebb görbületű a kontúr, amire a vetítőernyőn a szálkereszttel rá kell állni. További ok lehet még az, hogy a szálkereszt vastagsága állandó, a vizsgált átmérők viszont változó nagyságúak.

Az ismétléses szórásra az alábbi egyenlet írható fel:

$$u_{ismétlés} = 0,0202 \cdot d^{-0,462} \quad (30)$$

ahol d : a mért átmérő értéke.

4 KONKLÚZIÓ

A mérések és az elemzések elvégzése után elmondható, hogy a profilprojektossal történő mérés során a mérési pontszámoknak nincs szignifikáns hatása a mért eredményekre, ellenben a kalibráló gyűrűk mérete szignifikáns hatással bír. Az illesztési módszerek között gépészeti szempontból elhanyagolható különbséget tapasztaltunk. A Kasa és Pratt körillesztési módszerrel illesztett körök átmérője a geometriai LSC módszerrel illesztett körök átmérőjénél mindössze nanométer nagyságrendű különbség volt. A Taubin algebrai módszerrel illesztett körök átmérője a kijelvezhető tíz tizedes jegyig (milliméter esetében) nem mutatott eltérést a geometriai LSC módszerhez képest. A legkisebb köré írható köröknél elmondható, hogy minél több pontszámra illesztjük a kört, annál nagyobb lesz az LSC körtől való eltérése.

A vizsgálatunk által fény derült a profilprojektor azon tulajdonságára, hogy kis átmérőknél a hiba értéke nagyobb mint nagy átmérők esetén. Elmondható, hogy 25 mm-es vagy nagyobb átmérők mérésénél és LSC körillesztéssel a hiba értéke 2 mikrométer alatti értéken állandósulni látszik.

A továbbiakban célszerű lenne vizsgálni a profilprojektossal történő átmérő meghatározás során a nagyítási érték hatását az illesztett körök átmérőjének hibájára, eltérésére a helyes értéktől. Lehetne vizsgálni a legnagyobb beleírható (MIC), és a minimum zóna (MZC) körök jellemzőit a mérési pontszám és az átmérő függvényében. További vizsgálatokat lehetne folytatni arra vonatkozóan, hogy a pontokat a kalibráló gyűrűkre egymástól nem egyenlő távolságokra vesszük fel a teljes kerület mentén, hanem csak negyed, fél és háromnegyed körív mentén elosztva, így az egyes LSC matematikai módszereket ismét össze lehetne hasonlítani egymással.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Farago, F. T., & Curtis, M. A. (1994). *Handbook of dimensional measurement*. Industrial Press Inc..
- [2] ISO 1101:2017 Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out
- [3] Al-Sharadqah, A., & Chernov, N. (2009). Error analysis for circle fitting algorithms. *Electronic Journal of Statistics*, 3, 886-911.
- [4] Chernov, N., & Lesort, C. (2005). Least squares fitting of circles. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 23(3), 239-252.
- [5] Gander, W., Golub, G. H., & Strebel, R. (1994). Least-squares fitting of circles and ellipses. *BIT Numerical Mathematics*, 34(4), 558-578.

- [6] Umbach, D., & Jones, K. N. (2003). A few methods for fitting circles to data. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 52(6), 1881-1885.
- [7] Pratt, V. (1987). Direct least-squares fitting of algebraic surfaces. *ACM SIGGRAPH computer graphics*, 21(4), 145-152.
- [8] Maresca, P., Gomez Garcia, E., Caja Garcia, J., Barajas Fernandez, C., & Berzal Rubio, M. (2011). A proposal for the metrological characterization of circular features with digital optical machines. *American Institute of Physics-AIP Conference Proceedings*/Volume 1431.
- [9] Maresca, P., Gómez, E., Caja, J., Barajas, C., & Berzal, M. (2010). Use of coordinate measuring machines and digital optical machines for the geometric characterization of circumference arcs using the minimum zone method. *Measurement*, 43(6), 822-836.

A mérési bizonytalanságról

About measurement uncertainty

Drégelyi-Kiss Ágota

* Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Kar, Budapest, Magyarország

dregelyi.agota@bgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás — A mérések és mértékegységek igénye az emberi civilizáció kialakulásával egyidős, és jelentős fejlődésen ment keresztül a kereskedelem hatására. A metrológia, mint a mérés tudománya, magában foglalja a mérésekkel kapcsolatos elméleti és gyakorlati szempontokat, figyelembe véve a mérési hibákat és bizonytalanságokat. A tanulmány célja a metrológiai fogalmak és a mérési bizonytalanság legfrissebb nemzetközi előírásainak részletezése, valamint a mérési modellek kidolgozásának hangsúlyozása.

Kulcsszavak: mérési hiba, mérési modell, bizonytalanság

Abstract — The need for measurements and units of measurement is as old as the emergence of human civilisation and has evolved significantly under the influence of trade. Metrology, as the science of measurement, encompasses the theoretical and practical aspects of measurement, taking into account measurement errors and uncertainties. The aim of this paper is to provide details of the latest international guidelines on metrological concepts and measurement uncertainties, and to emphasise the development of measurement models.

Keywords: measurement error, measurement model, uncertainty

1 BEVEZETÉS

A mértékek és mértékegységek igénye és létrejötte majdnem egyidős az emberi civilizáció kialakulásával. Tulajdonképpen a mérés fogalma a számfogalom kialakulásával párhuzamosan keletkezett. Az emberi civilizáció történetében a mérések és mértékek tekintetében az igazán nagy fejlődéseket mindig a kereskedelmi tevékenységek indukálták. A történelem során a nagy civilizációs kultúrákban mindenhol fellelhetők a mértékegységek nyomai. Ugyanis az uralkodó csoportok ezen kultúrákban felismerték, hogy milyen fontos az egyes termékek és élelmiszer alapanyagok mennyiségének (súly- és űrmértékek), geometriai formák nagyságának (hosszúság mértékek) és földterületek nagyságának (területmértékek) egységes, összehasonlítható és a közösség által elfogadott („hiteles”) mérése. Nagyon fontos megemlíteni, hogy ezen korszakokban a mérések „hitelességét” természetesen csak erkölcsi alapokon volt lehetséges biztosítani. Műszaki vagy tudományos értelemben vett „hitelességet” csak a XIX. század második felétől van értelme említeni.

A metrológia (metron - mérték, logos - ész, értelem) a mérés tudománya. A metrológia a mérésekkel kapcsolatos minden elméleti és gyakorlati szempontot magába foglalja, bármekkora legyen is a mérés bizonytalansága, és a tudomány vagy a technológia bármely területén is végezzék

azokat. A metrológia alkalmazott tudomány, mely a kvantitatív ismeretszerzési folyamatok tervezéséhez, végrehajtásához és az eredmények értékeléséhez nyújt ismereteket [1].

A mérés során más mennyiségek is jelen vannak, melyek befolyásolják a mérés eredményét. A befolyásoló mennyiség a mérendő mennyiségtől különböző olyan mennyiség, amely hatással van a mérési eredményre (pl.: hőmérséklet, rezgés stb.). A zavaró mennyiség olyan befolyásoló mennyiség, melynek hatása nem ismert. A kétfajta hatás között az az alapvető eltérés, hogy a befolyásoló mennyiség mérési eredményre gyakorolt hatását ismerjük (fizikai összefüggéssel leírható), ez a hatás korrigálható, míg a zavaró mennyiség befolyásolja a mérési eredményt, de ennek mértéke nem ismert.

A tapasztalat igazolja, hogy az ismételt mérések eredményei általában nem egyezők. A mérőeszköz működése, a környezet, a mérőszemély előre nem meghatározható módon, de befolyással van az eredményre. Ez a véletlen hibából adódóan okozza az eltéréseket, melyek csökkenthetők a mérések számának növelésével.

Az etalon adott mennyiség definíciójának referenciaként használt megvalósítása. Fontos tulajdonsága, hogy ismert a mennyiségértéke és a mérési bizonytalansága.

Nemzetközi, nemzeti és természetesen vevői igény, hogy a mérési eredmények megbízhatók és összehasonlíthatók legyenek. A vizsgáló- és kalibrálólaboratóriumok működésének feltétele többek között az etalonok metrológiai visszavezethetőségének igazolása, de vállalati kalibrálás esetén is szükséges az etalonok egy pontosabb etalonnal történő összehasonlításának igazolása. A metrológiai visszavezetethez egy mérési eredménynek az a tulajdonsága, hogy az eredmény egy referenciához tartozik a kalibrálások dokumentált, megszakítatlan láncolatán keresztül, melyek mindegyike hozzájárul a mérési bizonytalansághoz. [1].

A mérési eredmények mindegyikét meghamisítja egy nem tökéletes mérési módszer, mérőberendezés vagy etalon, a környezet behatásai, a mérést végző személy szubjektív adottságai és más, többféle általunk nem ismert, de jelenlévő véletlen hatás. Emiatt a mérendő mennyiség „valódi” értéke és a mért érték között mindig van eltérés. (A fizikai állandók esetén a mennyiség úgy tekinthető, hogy egyetlen valódi mennyiségértéke van.) A valódi érték kísérletileg nem állapítható meg, de kétségtelenül létezik. A valódi értéket nem ismerhetjük meg, csak törekszünk annak legjobb becslésére, a referenciának tekinthető érték meghatározására. A becslés az elméleti jellemzők adott eljárással, módszerrel történő közelítése (korlátozott pontosságú meghatározása) az ismert véges számú és véges

pontosságú adatból. Általánosan referenciaértéknek (reference value) nevezzük a mért mennyiségértéket, amelyet valamely összehasonlítás alapjául kívánjuk használni. A referenciaérték lehet a mérendő mennyiség valódi értéke, és abban az esetben, amikor ezen érték nem ismert, az elfogadott értéke.

A mérési pontosság (accuracy) azt mutatja meg, hogy mennyire egyezik meg a mért mennyiségérték a mérendő mennyiség valódi értékével. A mérési hiba (error) a mért mennyiségérték és a referenciaérték különbsége:

$$H_i = x_i - x_{ref}$$

ahol: H_i - a mérési hiba; x_i - a mért érték; x_{ref} - a referenciaérték.

A mérések precizitását (precision) a véletlen hibák jellemzik. A véletlen hibák változó hatást mutatnak, a hibaokok időben és térben véletlenszerűen jelentkeznek, tehát nagyságuk és előjelük előre nem ismert módon változik, ezért hatásuk csak bizonytalanságként írható le. A véletlen hibák valószínűségi változók, értékelésükre a valószínűség számítás módszerei alkalmasak. Jellemezhetők egy olyan hibatartománnyal (sávval), mely tartalmazza adott valószínűséggel a mérendő mennyiség valódi értékét.

A bizonytalanság (uncertainty) a mérési eredmény minőségének mennyiségi mértéke, lehetővé teszi a mérési eredmény összehasonlíthatóságát más eredményekkel, referenciákkal, műszaki jellemzőkkel vagy szabványokkal. Minden mérés hibával terhelt, ezért a mérési eredmény eltér a mérendő mennyiség valódi értékétől.

Megfelelő idő és erőforrások esetén a mérési hiba legtöbb forrása felderíthető, meghatározható és korrigálható (például kalibrálások által). A mérési bizonytalanságot különböző módon lehet meghatározni. Széles körben használt és elfogadott módszer a „GUM-módszer” [2]. A GUM-módszer lényege, hogy minden jelentős hatást a megfelelő módon figyelembe kell venni.

A különböző helyeken készült alkatrészek szerelhetősége, a különböző laboratóriumok vizsgálati eredményeinek hitelessége, a jogi természetű, méréssel igazolható döntések igazságossága, és sok más helyzet mind azt igénylik, hogy pontos képet kapjunk arról a tartományról, amelyen belül a valódi érték adott valószínűséggel megtalálható. Ezért szükséges, hogy megismerjünk egy elfogadott eljárást az eredmény minőségének jellemzésére, vagyis a mért mennyiségérték „bizonytalanságának” kifejezésére és kiértékelésére. Ez a módszer célszerűen használható mindenfajta mérésnél, független, közvetlenül leszármaztatható, felhasználható másik mérés bizonytalanságának kiértékelésénél.

A szerző az Óbudai Egyetem Bánki Karán 2018-ban indult metrológus szakmérnök/szakember képzés egyik alapítója és szakfelelőse. A képzésünk során a különféle laborokból, ipari területről érkező hallgatók számára oktatjuk a legfrissebb metrológiai útmutatókat, előírásokat. Fontosnak tartjuk kollégáimmal, hogy a fizikai, kémiai és biológiai mennyiségek mérése során alkalmazott metrológiai kifejezések használata minél egységesebbé váljon Magyarországon. A tanulmány célja, hogy a metrológiai fogalmakkal és a mérési bizonytalansággal kapcsolatos legfrissebb nemzetközi előírásokat részletezze, felhívja a figyelmet a mérési modell készítésének fontosságára, majd egy esettanulmányon keresztül bemutassa a modellalkotás menetét.

2 METROLÓGIAI DEFINÍCIÓK

A mérésekkel kapcsolatos meghatározások a Nemzetközi Metrológiai Szótárban (VIM, International Vocabulary of Metrology) találhatóak. A VIM egy széles körben elismert dokumentum, amely a mérésekkel kapcsolatos szabványosított terminológiát tartalmazza. A VIM-et a Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) dolgozta ki, és célja, hogy harmonizálja a mérés technikában használt nyelvezetet a különböző iparágakban és területeken. A VIM olyan kulcsfogalmakat határoz meg, mint a mértékegységek, a pontosság, a bizonytalanság, a kalibrálás és más fontos kifejezések a mérés tudományban. A tudományos, ipari és szabályozási területeken dolgozó szakemberek számára elengedhetetlen az egyértelmű kommunikáció biztosítása érdekében.

2024-ben a VIM 3. kiadása van érvényben, amelyet először 2008-ban, majd kisebb helyesbítéseket követően 2012-ben publikáltak. A szak kifejezések minden területen érvényes meghatározásai azt a célt szolgálják, hogy függetlenül az alkalmazási területről (orvosi laborvizsgálatok vagy villamos mennyiségek mérése) egységes nyelvezetet használjunk mi, metrológiában dolgozó szakemberek. A hivatalos magyar nyelvű fordítás 2018-ban jelent meg az Akkreditált Szervezetek Klasztere (ASZEK) és tagjainak jóvoltából [3].

A nemzetközi bizottság, a JCGM dolgozik a Nemzetközi Metrológiai Szótár 4. kiadásán (VIM4), amelyet várhatóan a jövő év folyamán tesz közzé. A VIM4 számos fontos frissítést tartalmaz, hogy lépést tartson a metrológia fejlődő területével. Az egyik legfontosabb változás az új kifejezések és fogalmak felvétele, különösen az olyan újonnan megjelenő területeken, mint a digitális mérés és a kvantummetrológia, amelyek a technológiai fejlődés miatt egyre fontosabbak. Ezek az új kifejezések biztosítják, hogy a szótár lefedje a digitális és kvantumtechnológiákra támaszkodó modern mérőrendszereket. A VIM4 például olyan kifejezéseket tartalmaz, amelyek a szoftveralapú mérőrendszerek metrológiai visszavezethetőségének pontosságával és megbízhatóságával foglalkoznak, ami egyre nagyobb gondot jelent, mivel a digitális rendszerek egyre inkább a metrológia szerves részévé válnak.

Az új kifejezések mellett a VIM4 a meglévő kifejezések tisztázását és felülvizsgálatát is tartalmazza. Pontosítják az olyan kulcsfontosságú fogalmakat, mint a mérési bizonytalanság és a kalibrálás, hogy egyértelműbb definíciókat kínáljanak és kiküszöböljék a kétértelműségeket. Például a bizonytalanság fogalma kibővült, hogy jobban megragadja a különböző típusú mérőrendszerekben való alkalmazását, különösen az összetett, automatizált környezetekben. A kalibrálás definíciója kissé finomításra került, hogy hangsúlyozza annak kritikus szerepét mind az analóg, mind a digitális rendszerekben, tükrözve az alkalmazások szélesebb körét, amelyekre ma már kiterjed.

A VIM4 nagyobb hangsúlyt fektet a metrológia gyakorlati alkalmazására a modern ipari és tudományos környezetben. A szótár mostantól több példát és esettanulmányt tartalmaz, amelyek a mai mérési kihívások szempontjából relevánsak. Ez a gyakorlati fókusz biztosítja, hogy a terminológia ne csak tudományos szempontból legyen pontos, hanem releváns legyen azok számára is, akik olyan területeken dolgoznak, mint a gyártás, az egészségügy és az informatika, ahol a pontosság és a metrológiai visszavezethetőség kritikus fontosságú. A

mérőrendszerekkel kapcsolatos kifejezéseket például úgy dolgozták át, hogy azok egyértelműen magukban foglalják mind a hagyományos analóg műszereket, mind a modern digitális eszközöket.

A VIM4 másik jelentős változása a nemzetközi szabványokkal, a Nemzetközi Szabványügyi Szervezet (ISO) által kiadott szabványokkal való harmonizációra irányuló törekvés. Ez a harmonizáció biztosítja, hogy a metrológiai kifejezések a különböző szabványokban egységesek legyenek, megkönnyítve a globális kommunikációt és együttműködést azokon a területeken, amelyek nagymértékben támaszkodnak a mérésekre. A VIM4 ISO-szabványokhoz való igazodása segít a szabályozási folyamatok és a minőségbiztosítás egyszerűsítésében is azokban az iparágakban, ahol a nemzetközi szabványok kulcsfontosságúak.

3 ÚTMUTATÓ A MÉRÉSI BIZONYTALANSÁG MEGHATÁROZÁSÁHOZ

Az Útmutató a mérési bizonytalanság meghatározásához (GUM, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) egy, a JCGM által először 1995-ben kidolgozott dokumentum (GUM 1995, [4]), amely iránymutatást ad a mérési bizonytalanság értékeléséhez. Elsődleges célja a mérési bizonytalanság kiszámításának, dokumentálásának és közzétételének szabványosítása, biztosítva, hogy az eredmények összehasonlíthatók és megbízhatók legyenek a különböző területeken és intézményekben. A GUM kisebb korrekciókat követve 2008-ban került publikálásra JCGM 100:2008 [2] néven, amely jelenleg is érvényes.

A JCGM GUM szakbizottsága folyamatosan fejleszti és dolgozza ki a mérési bizonytalanság értékelésével kapcsolatos útmutatókat. A könnyebb hivatkozások végett egyszerűsített elnevezéseket vezetett be a [8] 1. mellékletében. Jelenlegi és a tervezett (*) GUM dokumentumok a következő elnevezéseket kapják:

GUM-1 Guide to the expression of uncertainty in measurement—
Part 1: Introduction

*GUM-2 Guide to the expression of uncertainty in measurement—
Part 2: Concepts

GUM-3 Guide to the expression of uncertainty in measurement—
Part 3: GUM:1995 with minor corrections

GUM-4 Guide to the expression of uncertainty in measurement—
Part 4: The role of measurement uncertainty in conformity assessment

GUM-5 Guide to the expression of uncertainty in measurement—
Part 5: Examples

GUM-6 Guide to the expression of uncertainty in measurement—
Part 6: Developing and using measurement models

GUM-7 Guide to the expression of uncertainty in measurement—
Part 7: Propagation of distributions using a Monte Carlo method

GUM-8 Guide to the expression of uncertainty in measurement—
Part 8: Extension to any number of output quantities

*GUM-9 Guide to the expression of uncertainty in measurement—
Part 9: Statistical models and data analysis for interlaboratory studies

*GUM-10 Guide to the expression of uncertainty in measurement—
Part 10: Applications of the least squares method

*GUM-11 Guide to the expression of uncertainty in measurement—
Part 11: Bayesian methods

*GUM-12 Guide to the expression of uncertainty in measurement—
Part 12: Basic methods for uncertainty propagation

A *mérési eredmény* a mérendő mennyiségnek tulajdonított mennyiségértékek készlete, minden más elérhető alkalmas információval együtt. A mérés eredménye általában egy egyedüli mért mennyiségérték és egy mérési bizonytalanság együtteseként van kifejezve. A *mérési bizonytalanság* nem-negatív paraméter, amely a mérendő mennyiségnek a felhasznált információk alapján tulajdonított mennyiségértékek szóródását jelenti [3]. Mindez azt jelenti, hogy a mérési eredmény megadásához szükséges a mérés bizonytalanságának kifejezése is, amelyhez a GUM-3 ad segítséget. Kiemelkedően fontos, hogy meghatározzuk a mérés bizonytalanságát, ha mérési eredményeket szeretnénk összehasonlítani, ha egy mért értéket vetünk össze a specifikációs határértékekkel (megfelelőségi nyilatkozat közzététele), valamint, ha tudományos elméletek validálása vagy fejlesztése a célunk.

A mérési bizonytalanság többféleképpen is kifejezhető:

- standard, valamint eredő standard mérési bizonytalansággal,
- kiterjesztett mérési bizonytalansággal, megadva a hozzá tartozó k kiterjesztési tényezőt,
- megbízhatósági tartomány adott megbízhatósági valószínűséggel, vagy
- a mérendő mennyiség leírása valószínűségi sűrűségfüggvénnyel [5].

A mérési bizonytalanság értékelése nem csupán matematikai feladat, hanem a mérendő mennyiség és a mérési folyamat részletes ismeretét igényli. A pontos és megbízható eredmény elérése a szakemberek kritikai elemzésén, megértésén és körültekintésén múlik. Az értékelési módszer kiválasztásakor figyelembe kell venni a rendelkezésre álló információkat, az alkalmazandó feltételezéseket, a szükséges eredménytípust, valamint azt, hogy mennyire támaszkodhatunk a meglévő adatokra. A bizonytalanság kezelése ezért minden esetben egyedi megközelítést igényel. A végső eredmény hasznossága és minősége attól függ, hogy a szakemberek milyen mértékben alkalmazzák tudásukat és tapasztalatukat a mérési folyamat értékelésében [8].

A mérési bizonytalanság kifejezéséhez szükséges, hogy meghatározzuk a mérés modelljét. A mérési modell lehet matematikai vagy algoritmikus, tartalmazza a bemenő mennyiségeket és a kimenő mennyiséget. A mérési modell meghatározásának részletezését a következő fejezetben folytatjuk.

A GUM-3 kétféle módszert kínál a mérési modellben szereplő bemeneti mennyiségek értékeire vonatkozó bizonytalanság értékelésére. „A”-típusú értékelésnek nevezzük a mért mennyiségértékek statisztikai elemzésével nyert értékelését, „B”-típusú értékelésnek az ettől eltérő módon meghatározott bizonytalansági számítást.

A GUM a mérési bizonytalanság kiértékeléséhez alapvetően két módszert ajánl. A hibaterjedési törvény (law of propagation) alapján történő bizonytalanság meghatározást a JCGM GUM-3 [2][4] tartalmazza. A másik módszer a Monte-Carlo módszerrel történő bizonytalanság értékelés [5], amelynek útmutatóját 2008-ban adták ki.

A JCGM GUM-3 szerinti bizonytalanság meghatározás egy egyszerűsített megközelítés. Ez a módszer a bemeneti mennyiségek becsléseit és a hozzájuk tartozó standard

bizonytalanságokat, valamint a mérési modell linearizált formáját veszi alapul, hogy megkapja a kimeneti mennyiség, a mérendő mennyiség becslését és standard bizonytalanságát. Ez a módszer elsősorban a jól jellemzett fizikai mennyiségek mérésére alkalmas.

A másik, szélesebb körben alkalmazható értékelési módszer (GUM-7) az eloszlások terjedésének alkalmazása, amelyet gyakran Monte Carlo-módszerrel valósítanak meg [5]. Ez a módszer ahelyett, hogy a bemeneti mennyiségek becsléseit és standard bizonytalanságait venné, a bemeneti mennyiségekhez rendelt valószínűségi sűrűségfüggvényeket veszi bemenetként. Egy mérési modell segítségével a mérendő mennyiség valószínűségi sűrűségfüggvényének közelítését kapjuk meg, amelyből kiszámítható a becslés, a standard bizonytalanság és a mérendő mennyiségre vonatkozó adott valószínűséghez tartozó megbízhatósági intervallum.

Az eddig említett két módszer [2][5] egy kimeneti mennyiség esetén alkalmazható. A GUM-8 [6] útmutató a mérési bizonytalanság értékelésének elveit kiterjeszti a többváltozós modellekre, ahol több kimeneti mennyiség függ a bemeneti mennyiségek közös halmazától. A bizonytalanság terjedésére a Monte Carlo-módszert alkalmazza, amely véletlenszerű mintavételt használ a kimeneti mennyiségek varianciáinak és kovarianciáinak hatékony értékelésére. A GUM-8 a többváltozós modellek esetében bevezeti a megbízhatósági régió fogalmát is, amely egy kimenettel rendelkező modellek esetében használt megbízhatósági intervallummal, és amely meghatározza azt a régiót, amelyen belül a kimeneti mennyiségek valódi értékei várhatóan fekszenek.

4 A MÉRÉSI MODELL ÉS KIDOLGOZÁSA

A mérési modell a kimeneti mennyiségek és a mérésre hatással bíró bemeneti mennyiségek közötti kapcsolatot jelenti [7]. A modellek segítenek a mérés kvantitatív megértésében és javításában, lehetővé téve a bemeneti mennyiségek értékeinek megadását a kimeneti mennyiségekhez. Emellett a modellek segítik a bizonytalanságok terjedésének nyomon követését is, és megmutatják a főbb bizonytalansági forrásokat. A mérési modellek lehetnek elméleti, empirikus vagy hibrid típusúak, és egy vagy több kimeneti mennyiséget is tartalmazhatnak. A megfelelő modell kiválasztása kulcsfontosságú a megbízható eredmények eléréséhez, figyelembe véve a modell paraméterezésének és numerikus viselkedésének hatását is.

A mérés modellje tehát a következőképpen alakul:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

ahol Y a kimeneti mennyiség, X_i ($i=1\dots N$) az i -edik bemeneti mennyiség. Az f függvény minden olyan mennyiséget tartalmaz, beleértve a korrekciós tagokat és tényezőket is, amelyek számottevő mértékben hozzájárulhatnak a mérés bizonytalanságához.

A mérési modell kidolgozása során a következő lépéseket kell megtenni [6]:

1. Válasszuk ki és specifikáljuk a mérendő mennyiséget!
2. Modellezzük a mérési elvet, válasszunk megfelelő matematikai kifejezést!
3. Azonosítsuk a mérésre hatással lévő tényezőket!
4. Bővítsük ki a mérési modellt a szükséges hatásokkal!
5. Értékeljük a modell megfelelőségét!

4.1 Mérendő mennyiség specifikálása

A megcélzott mérési bizonytalanság mértékének meghatározásával kezdődik a mérési modell meghatározása. A mintavétellel kapcsolatos bizonytalanságok, mint például a vízminőség vizsgálata, gondos mintavételi tervet igényelnek. Fontos, hogy a mérési eredmények csak adott körülmények mellett, például a hőmérséklet és más környezeti tényezők figyelembevételével érvényesek. Amennyiben ezek a körülmények megváltoznak, az eredmények átszámítása szükséges, mint például hossz mérés esetén, ahol a hőmérséklet változásának lineáris hőtágulása is számít. Különböző modellek segíthetnek az azonos mérendő mennyiség meghatározásában, akár azonos mérési elv mellett is. Fontos azonban megjegyezni, hogy a mérési modellek nem mindig teljes körűek; csupán azokat a tényezőket veszik figyelembe, amelyek jelenlegi tudásunk szerint lényegesek.

4.2 Mérési elv modellezése, matematikai kifejezés választása

A mérési elv lehetővé teszi egy alapmodell felállítását, amely gyakran egy tudományos törvényen vagy ilyen törvények kombinációján alapul. Az elméleti mérési modellek tudományos elméleten alapulnak, az empirikus modellek gyakran statisztikai modellek. Vannak hibrid és differenciálegyenleteken alapuló modellek is. A mérés matematikai alakja szerint lineáris, nem lineáris, egyváltozós vagy többváltozós, implicit vagy explicit.

A mérés matematikai leírásának elvégzése során a célunk egy megbízható elméleti alak kialakítása. Ehhez célszerű fizikai törvényszerűségeket és alapelveket felhasználni, amelyek segítenek a mérési modell pontos meghatározásában. Fontos figyelembe venni a megcélzott mérési bizonytalanságot, mivel ez meghatározza, hogy milyen tényezőket kell figyelembe venni a közelítésnél. A modell egyszerűsége kulcsfontosságú, ugyanakkor többlépcsős mérési modellek alkalmazása is indokolt lehet, különösen, ha a mérési tartomány helyes lefedésére van szükség.

Esetenként érdemes több mérési modellt is használni, hogy szélesebb spektrumot fedjünk le. A mérési bizonytalanság forrásait is lényeges feltérképezni, mivel ezek befolyásolják az eredmények megbízhatóságát. A bemeneti változók kiválasztása során fontos, hogy csak a szignifikáns tényezőket vegyük figyelembe, ezzel csökkentve a bonyolultságot. A statisztikai modellek alkalmazása lehetővé teszi a mérési adatok pontosabb elemzését, miközben figyelembe kell venni a numerikus pontosságot és a számítási precizitást is.

4.3 Mérésre hatással lévő tényezők azonosítása

A mérési elvet leíró alapmodell ideális körülmények között érvényes. Ezt a modellt általában ki kell terjeszteni a mérés gyakorlati végrehajtása során fellépő hatások lefedésére. Ezeket a hatásokat azonosítani kell, és figyelembe kell venni a modellbe való bevonás céljából, hogy a célnak megfelelő mérési modellt kapjunk.

A mérésre hatással lévő tényezők:

- A mérendő mennyiség meghatározásának megvalósítása
- A mérés modellezésének feltételei, közelítései
- Mérés körülményei
- Külső hatások (pl. környezeti)
- Mérési rendszer driftje
- Etalonok és tanúsított anyagminták (CRM)
- Vizsgálandó tárgyak, anyagok inhomogenitása, instabilitása
- Mintavételezés
- Minta előkészítés
- Kalibrálás
- Analóg vagy digitális mérőeszköz leolvasása
- Rendszer felbontása
- Nullapont beállítás
- Észlelések közötti ingadozások, korrelációk.

A mérési eljárás során sok tényezőt adott határértékek között kell tartani (pl. hőmérséklet). Alapelveként ezeket a tényezőket bele kell venni a modellbe.

4.4 Mérési modell kibővítése

Az alapmodell továbbfejlesztésének célja, hogy kiegészítse azt egy olyan mérési modellé, amely magában foglalja a mérési eredményt befolyásoló összes mennyiséget és hatást. Két fontos döntést kell hozni, amikor egy hatást beillesztünk a modellbe: a) a hatást az alapmodellben egy bemeneti mennyiség megfigyelt értékeire gyakorolt hatásként vagy a kimeneti mennyiség megfigyelt értékeire gyakorolt hatásként modellezzük-e, és b) a hatás elég jól leírható-e ahhoz, hogy korrekciót lehessen rá alkalmazni.

4.5 Modell megfelelőségének értékelése

Egy mérési modell akkor megfelelő, ha a mérőeszköznek a modell segítségével kapott becslése korrigálva van az összes ismert hatásra, és a kapcsolódó bizonytalanság tükrözi az összes olyan tényezőt, amely észszerűen befolyásolhatja a becslést. A mérési modellnek továbbá képesnek kell lennie arra, hogy megadja a becsléseket és a kapcsolódó bizonytalanságokat.

A mérési modell kimenetének kísérleti értékelésére különböző módszerek léteznek, például

- laboratóriumok közötti összehasonlításban való részvétel és a mérési modelltől származó becslés és bizonytalanság felhasználása a teljesítmény-értékelésben,
- tanúsított anyagminta (CRM) vagy referencia-módszer használata a mérési eljárás teljesítményének értékelésére,
- a mérési modell kimenetének összehasonlítása irodalmi vagy referenciaadatokkal.

A mért és a referenciaértékek közötti, a megfelelő bizonytalanságokon belüli egyezés kimutatásával alátámasztjuk a modell megfelelőségét.

5 ESETANULMÁNY MÉRÉSI MODELL KIDOLGOZÁSÁRA

Vegyünk egy egyszerű példát, amelyen keresztül be tudom mutatni, hogyan lehet a mérési modellt elkészíteni. Minden mérés esetén lehetséges mérési modell kialakítása, és mivel a körülmények nagyon erősen befolyásolják a mérés eredményét, ezért fontos a mérés és annak körülményeinek részletes meghatározása. A mérési modell nem általánosságban érvényes az adott mérés bizonytalanságának a feltérképezésére, hanem csakis adott körülmények között.

5.1 Mérés leírása, mérendő mennyiség specifikálása

Egy fém henger (10 mm névleges magasság, 5 mm névleges átmérő) térfogatát szeretném meghatározni laboratóriumi körülmények között 20 °C-ra vetítve. A mérést egy hosszmerés-technikai laboratóriumban, gránitasztalon végzem. A környezeti hőmérséklet 20 °C ± 1,5 °C, a páratartalom 40% és 60% közötti. A méréshez két mérőeszközt használok. A henger magasságát 0,01 mm felbontású digitális tolmérővel mérem meg, a henger átmérőjét pedig 0,001 mm felbontású digitális mikrométerrel. A mérés előtt a vizsgálandó hengert és a mérőeszközöket a laboratóriumban temperálok fém lapon 2 órán keresztül.

5.2 Mérési alapmodell

A henger térfogatának (V) a meghatározása a henger magasságából (m) és a henger átmérőjéből (d) a következőképpen alakul (matematikai összefüggések alapján):

$$V = \frac{d^2\pi}{4} \cdot m$$

5.3 Mérésre hatással lévő tényezők

A mérendő mennyiség meghatározása során kétféle mérőeszközt és mérési eljárást alkalmazunk.

- átmérő (d) mérése során
 - mikrométerrel történő ismételt mérések hatása (I_{sm}) – a mért értékben ($d_{mért}$) jelenik meg
 - mikrométer véges felbontásából eredő hatás (Res)
 - a hőmérséklet okozta bizonytalanság (T)
 - mikrométer torzításából eredő hatás (kalibrálás) (Cal)
 - mikrométer driftjéből eredő hatás ($Drift$)
 - a henger körköröségének hibájából eredő hatás (pl. ovalitási hiba miatt) ($Kör$)
- magasság (m) mérése során
 - tolmérővel történő ismételt mérések hatása (I_{sm}) – a mért értékben ($m_{mért}$) jelenik meg
 - tolmérő véges felbontásából eredő hatás (Res)
 - tolmérővel történő nem megfelelő befogás hatása (Bef)
 - a hőmérséklet okozta bizonytalanság (T)

- tolómérő torzításából eredő hatás (kalibrálás) (*Cal*)
- tolómérő driftjéből eredő hatás (*Drift*)
- a henger két zárósíkjának párhuzamosságtól való eltérése okozta hatás (*Párh*)
- térfogat (*V*) meghatározása során
 - páratartalom hatása (*PT*)
 - kerekítésből, számításból eredő hatás (*Kerek*)

5.4 Mérési modell kibővítése

Az eredeti alapmodell:

$$V = \frac{d^2 \pi}{4} \cdot m$$

A kibővített, mérési modell az alapmodellből származik. Az egyes hatásokat, amelyeket az 5.3 fejezetben meghatároztunk, be kell illeszteni az alapmodellbe. Ennek módja, hogy minden egyes tagot egy δ -val jelölt tagként vesszünk figyelembe, és a mérési modellben ezek is egy-egy bemeneti mennyiséggé válnak. A mérési modellben az indexek az előző alfejezet adott hatására utalnak (pl. δd_T : az átmérő mérési során a hőmérséklet általi korrekciót jelenti).

$$V = \frac{(d_{\text{mért}} + \delta d_{\text{Res}} + \delta d_T + \delta d_{\text{Cal}} + \delta d_{\text{Drift}} + \delta d_{\text{Kör}})^2 \cdot \pi}{4} \cdot (m_{\text{mért}} + \delta m_{\text{Res}} + \delta m_{\text{Bef}} + \delta d_T + \delta d_{\text{Cal}} + \delta d_{\text{Drift}} + \delta d_{\text{Párh}}) + \delta V_{\text{PT}} + \delta V_{\text{Kerek}}$$

A mérési modell általános alakja, amelyből a mérési bizonytalanságot meg lehet határozni a GUM-3 alapján:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

Ebben a konkrét esetben azt jelenti, hogy a kimeneti változó, Y a térfogat (V), és összesen $N=15$ különféle bemeneti változót azonosítottunk ($X_1 = d_{\text{mért}}$; $X_2 = \delta d_{\text{Res}}$; $X_3 = \delta d_T$; ..., $X_{15} = \delta V_{\text{Kerek}}$).

A kidolgozott mérési modell alapján el lehet készíteni a bizonytalanság-jegyzéket (bűzset), amellyel meghatározhatjuk a mérés eredményét, beleértve a kiszámított kiterjesztett mérési bizonytalanság értékét.

6 ÖSSZEGRÉS

A metrológia fejlődése szorosan összefonódik az emberi civilizáció kereskedelmi és tudományos igényeivel, hiszen a megbízható mérések alapvetők a minőségellenőrzés és az összehasonlíthatóság szempontjából. A mérések pontossága és bizonytalansága nemcsak a tudományos kutatásban, hanem a mindennapi ipari alkalmazásokban is kiemelkedő jelentőséggel bír. Az új metrológiai irányelvek, mint például a VIM4 és a GUM sorozat, modernizálják a mérési gyakorlatokat, lehetővé téve a digitális technológiák integrálását is a mérési folyamatokba. A megfelelő mérési modellek kialakítása és a bizonytalanságok pontos kezelése elengedhetetlen a megbízható és reprodukálható eredmények eléréséhez. Összességében a metrológiai eljárások folyamatos fejlesztése és a mérési eredmények

értékelésének standardizálása kulcsszerepet játszik a tudományos és ipari szféra hatékonyságának növelésében.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném kifejezni hálámat Paulik Szabinának a kézirat alapos és építő jellegű kritikai véleményezéséért.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML (2012). International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM). Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 200:2012. (3rd edition).
- [2] JCGM GUM-3: IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML (2008). Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 100:2008.
- [3] VIM3 Nemzetközi Metrológiai Értelmező Szótár – Alapvető fogalmak, kapcsolódó szakkifejezések (2018)
- [4] ISO/IEC Guide 98 (1995) A Guide to Expression of Uncertainty in Measurement, Switzerland
- [5] JCGM GUM-7: BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 101:2008.
- [6] JCGM GUM-8: BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Evaluation of measurement data — Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Extension to any number of output quantities. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 102:2011.
- [7] JCGM GUM-6: BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Guide to the expression of uncertainty in measurement — Part 6: Developing and using measurement models. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM GUM-6:2020.
- [8] JCGM GUM-1: BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Guide to the expression of uncertainty in measurement — Part 1: Introduction. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM GUM-1:2023.

CNC oktatás jelentősége a gépészmérnök képzésben

Importance of CNC education in mechanical engineering training

Burai István György

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország
burai.istvan@uni-obuda.hu

Összefoglalás — A számítógéppel támogatott gyártás nem csak a jelen, hanem a jövő részét is képezi. Az Ipar 4.0 egyik alappillére a CAM rendszerek által biztosított gyártási folyamatok. Cikkemben rávilágítok az NC-CNC technológiához kapcsolódó képzés fontosságára. Bemutatom az idevonatkozó képzés megszületését, fejlődését és jelenét. Ismertetem az oktatás struktúráját a hozzá kapcsolódó tantárgyakat és a megszerezhető kompetenciákat. Felvázolok egy lehetséges oktatásfejlesztési irányt, melynek része az NC-CNC technológia. Az Ipar 4.0 összefoglalásával igazolom a CNC oktatás jelentőségét a gépészmérnök képzésben és az ezzel kapcsolatos fejlesztések szükségszerűségét.

Kulcsszavak: NC-CNC, oktatás, kompetencia, képesség, tantárgyak, Ipar 4.0

Abstract — The computer aided manufacturing is both of part of the present and the future. The manufacturing processes aided by CAM systems are one of the base pillar of Industry 4.0. My article highlights to the importance of the education based on NC-CNC technology. I present the birth, development and present of the relevant training. I explain the structure of the education, the related subjects and the acquirable competences. I outline a possible developing direction of the education of which the NC-CNC technology is also a part. By summarizing Industry 4.0 I justify the importance of CNC training in mechanical engineering education as well as the necessity of CNC development.

Keywords: NC-CNC, education, competency, ability, subjects, Industry 4.0

1 BEVEZETÉS

Vessünk egy pillantást a környezetünkben található tárgyakra, eszközökre, berendezésekre és tudatosítsuk magunkban, hogy ez egy jól megkomponált gyártási folyamat lenyűgöző eredménye. Néhány ezer évvel ezelőtt az ember a természetben talált anyagokat használta eszközként, amivel használati tárgyakat és újabb eszközöket készített. A folyamatosan emelkedő igények kielégítésére az emberi erő, mint energiaforrás kevésnek bizonyult s az évszázadok során más és más energiaforrást vontunk be a termékek megformálására. Az emberi leleményességnek köszönhetően a gyártásra szánt eszközök hatékonyabbá és összetettebbé váltak. Egyre inkább a gépesítés került előtérbe, ahol a szerkezet még ember által vezérelt. A megmunkáláshoz szükséges

mozgásokat ember hajtotta végre, így a termelés hatáskörmérője az emberi tényező lett. Ez befolyásolta a termék minőségét, a termelt mennyiséget és így a termelés gazdaságosságát. A technikai fejlődés hajtórugója az emberi tényező által okozott problémák és hiányosságok csökkentésére és megszüntetésére való törekvés. Nyolcvan évvel ezelőtt a forgácsolás területén megjelent a számítógépes támogatás és bizonyos folyamatok automatizálttá váltak. Mára a termék előállításához tartozó részfolyamatokat számítógépes rendszerek szabályozzák, vezérlik minimális emberi beavatkozás mellett. Ezek a szoftverek összetettségükből fakadóan bonyolultnak tűnnek, de komplexitásuknak köszönhetően teljesen lefedik az adott terület igényeit. Ezeket a számítógépes rendszereket emberek kezelik, programozzák, ők határozzák meg a működés paramétereit, így a termék előállításához tartozó technikai fejlődés szükségszerűvé teszi az oktatás és a képzés fókuszának módosítását. A 20-30 évvel ezelőtt oktatott ismeretanyag mára az adott tudomány megértését szolgáló tudásunk alapját jelenti.

2 CNC OKTATÁS MÚLTJA

Az Óbudai Egyetem Bánki Karán, ami akkor még Bánki Gépipari Műszaki Főiskola volt, az NC-CNC technológia oktatása az 1970-s években indult és a mai napig töretlenül folytatódik. Az eltelt negyven év alatt a képzés számos változáson és fejlesztésen ment keresztül igazodva az ipari szereplők elvárásaihoz. Az oktatás mozgatórugója a fejlődés elősegítése és a végzett szakemberek minél hatékonyabb ipari integrációja. Így az NC-CNC oktatás hatást gyakorolt a hozzá tartozó technológia széles körű felhasználására.

A Kohó- és Gépipari Minisztérium támogatásával 1970-ben létrehozták a Szerszám gép Programozási Egyesületet (SPE), melynek elsődleges célja az volt, hogy elősegítse az NC technológia magyarországi elterjedését [4]. Az egyesület tagjai nagy szakmai tudással rendelkező szakemberek voltak, akik elméleti ismeretekkel ugyan rendelkeztek, de gyakorlati tapasztalatszerzésre nem volt lehetőségük. Ezt az akkori ipari háttér nem tette lehetővé, hiszen az amúgy is kevés NC berendezést senki nem akarta kivonni a termelésből. A Bánki Gépipari Műszaki Főiskola Gépgyártástechnológia tanszéke ezen a ponton lépett be az NC technológia oktatásának vérkeringésébe. Czéh Mihály, Barótfi István és a Szerszám Ipari Művek (SZIM) közreműködésével megindult az NC-CNC technológia gyakorlati képzése. 1976-ban csatlakozott az

oktatói gárdához Hervay Péter, aki jelenleg is az OE BGK GTI megbecsült tagja. A képzés országos szintű volt, az oktatók minden olyan vállalatnál megfordultak, ahol NC-CNC szerszámgépet alkalmaztak és a gépeken dolgozó gépkezelőket és programozókat tanították be. A főiskolai oktatás mellett tanfolyamokat is szerveztek, ahol közel 8000 szakembert képeztek ki. A Bánki Donát Műszaki Főiskola Gépgyártástechnológia tanszéke az SPE szervezésében 1988-ig vett részt a tanfolyami képzésekben. Ez alatt az idő alatt a jól bevált technológiához tartozó adatokat összegyűjtötték, majd az SPE közzétette az iparvállalatok számára, így ösztönözve őket az NC-CNC technológia alkalmazására.

A Bánkin dolgozó szakembergárdának köszönhetően az 1973-as gyártású SZIM 500-as tárcsaeszterga megszerzésével az NC technológia gyakorlati oktatásában több évvel megelőztük a Budapesti Műszaki Egyetem (BME) gépgyártástechnológiai tanszékét. Ez a gép volt az első NC vezérlésű gép, amely az oktatásban is részt vett. Technikatörténeti érdekesség, hogy az utasításokat lyukszalagra rögzítették, így tárolták majd olvasták be a gépbe a programot. Először "kalauz lyukasztót", majd később írógépes lyukszalag lyukasztó-olvasó berendezést használtak a hallgatók (1. ábra). A kimeneti eszköz nem monitor volt, hanem egyszerűen írógéppel papírra írtatták ki az információkat.



1. ábra: Kalauz lyukasztó, lyukszalag és lyukasztó írógép [1][2][3]

A következő gépet 1978-ban vásárolta az egyetem, ez egy Terco lyukszalagos NC marógép volt. Oktatásra kiváló volt, mert a modell jellegének köszönhetően minden részegységhez könnyen hozzá lehetett férni és mérőeszközöket csatolni (Voltmérő, oszcilloszkóp), amiknek keresztül megfigyelhetővé vált minden változás. A megmunkáló programot lyukszalagra rögzítették egy írógéppel kombinált lyukszalag, lyukasztó-olvasó berendezés segítségével.

Az 1980-as évek elejére megjelentek a számítógépes számjegyvezérlésű gépek röviden a CNC-k (Computer

Numerical Control). Lépést tartva az iparban bekövetkező változásokkal a következő megmunkálógép egy EMCO 5 nevű CNC vezérlésű asztali kiseszterga volt (2. ábra). Méretéből adódóan elfért egy tolokocsin, így lehetőség nyílt a tantermi bemutatásra és használatra. Ennek köszönhetően a hallgatók programozást, gépbeállítást és próbaforgácsolást végeztek rajta. A gép rendelkezett túlterhelés elleni védelemmel, hibás program esetén sem történt baj, használata biztonságos volt. A megírt programokat mikrozettára mentették. Az idők során korszerűtlenné váló gépet 2016-ban Fekete Bendegúz hallgató TDK és szakdolgozat keretén belül újította fel a gépet, többek között új vezérlést, valamint léptető motorokat kapott.



2. ábra: EMCO compact 5 CNC eszterga [5]

Az ipari elvárásnak való megfelelés érdekében az oktatásban olyan típusú gépekre volt és van szükség, melyeket a mindenkori valós gyártásban is használnak. Az NC oktatás részére 1980-ban beszerettek egy EEN 320 kéttengelyes CNC esztergagépet Hunor PNC712 vezérléssel, amit később egy korszerűbb NCT90T egységre cseréltek. Ezután 1981 őszén megérkezett egy háromtengelyes MSN 500 CNC marógép Hunor PNC714 vezérlővel. Az elmúlt 40 évben kétszer cseréltek rajta vezérlő egységet a korszerűsítés jegyében. Jelenleg NCT2000-es vezérlővel van ellátva. Megérkezésük után azonnal bevonták a gépeket az oktatásba. A CNC programozás 2D és 2,5D oktatásával programozási, a Megmunkálógépek III. tantárgy keretein belül pedig az NC technikához tartozó hardver és szoftver ismereteket szerezhettek a hallgatók. A képzés a szó szoros értelmében gyakorlat-orientált volt. A hallgatók kis létszámú csoportokban gépbeállítást, programbevitelt, tesztelést és gyártást végeztek a gépen.

Az oktatás mellett a kutatás is nagy jelentőséggel bír a felsőoktatásban és a CNC szerszámgépek óriási segítséget nyújtanak ebben. 1982-ben erre a célra érkezett egy három tengelyes és egy plusz (4.) opcionális tengellyel rendelkező Fehlmann P100 CNC marógép Bandit vezérlővel, ami később 2000-ben Heidenhein vezérlést kapott. Ezt a gépet kizárólag kutatásra használták. Jelenleg gyártási célokat szolgál.

A CNC szerszámgépek hardveres és szoftveres fejlődésével lépést tartva 1995-ben az egyetem tulajdonába került egy négytengelyes ellenorsós hajtott

szerszámos CNC esztergagép, amely robotos kiszolgáló egységgel volt ellátva. A MAZAK QT10 rugalmas gyártó cellára (3. ábra) külön fakultatív tárgyat szerveztek, ahol a paraméteres programozás, felügyeleti rendszer használat, adatbank feltöltés és használat került ismertetésre. Ezen kívül a hallgatók megismerték a Gentry 50 robot és az eszterga cella együttműködését, valamint lehetőség nyílt a robot Teach In programozásának elsajátítására. [Hervay Péter]

3 KOMPETENCIÁK, KÉPESSÉGEK ÉS KÉSZSÉGEK

A kompetencia kifejezés latin eredetű szó, jelentése illetékesség. Mai értelemben a kompetencia szavunk egyrészt illetékességet, jogosultságot, másrészt pedig szakértelmet, alkalmasságot hordoz magában. A kompetens és inkompetens kifejezések a kompetencia szó pozitív és negatív, az ember minőségi megítélésére utaló értelmezése. A kompetenciát tévesen a képességgel azonosítjuk, de a képesség valójában azonos összefüggésben lévő összetett problémák sikeres megoldásához szükséges feltétel. A kompetencia tehát a tanult és tapasztalt készségek és képességek összessége egy adott területre értelmezve. A robbanásszerű technológiai fejlődés hozadéka a munkaerőpiac változása, ahol szakmák, foglalkozások megszűnnek, létrejönnek és átalakulnak. Ehhez a változáshoz újabb és újabb kompetenciákra van szükség. Az óvodától az egyetemig az oktatási intézmények óriási szerepet vállalnak a képességek és készségek fejlesztésében. A megszerzhető kompetenciák megfogalmazásában irányelv a 21. századnak való megfelelés. Fontos követelmény a képességek és készségek adott területre vonatkozó relevanciája. Az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar (OE BGK) eleget téve ezen elvárásoknak fogalmazta meg a képzési által megszerzhető kompetenciákat. [6]

Cikkemben arra szeretnék rávilágítani, hogy miért fontos az NC-CNC technológiával kapcsolatos ismeretek átadása illetve megszerzése, ezért a teljesség igénye nélkül foglalom össze az OE BGK által megfogalmazott idevonatkozó kompetenciákat.

A hallgató a tanulmányai során olyan képességeket és készségeket sajátíthat el mellyel átfogó ismeretet szerez az NC-CNC technológia valamennyi szegmenséről. Megismeri a gyártástechnológiai, irányítástechnikai eljárásokat és működési folyamatokat. Megtanulja az alkalmazott munka- és erőgépek, gépészeti berendezések, eszközök működési elveit, szerkezeti felépítését, értelmezi az alkalmazott rendszerelemek kialakítását és kapcsolatát. A szerzett kompetenciák révén alkalmazza a gépészeti termék-, folyamat- és technológiai tervezéshez kapcsolódó számítások elveit és módszereit. Képesé válik a szakmai problémák azonosítására elvi és gyakorlati háttérének feltárására. Egy mérnöki probléma megoldásához alkalmazni tudja a szakterület legfontosabb terminológiáit, elméleteit, eljárásrendjét és a szerzett informatikai ismereteit. A műszaki rendszerek és folyamatok alapvető modelljeinek megalkotása nem okoz gondot számára. Alkalmassá válik a biztonságtechnikai, tűzvédelmi és higiéniai szabályok betartására és betartatására. Megtanulja a gépek, gépészeti berendezések beállításának és üzemeltetésének elveit és gazdaságossági összefüggéseit. Nem zárkózik el a szakterületen bekövetkező innovációk, technológiai fejlesztések megismerésétől és elfogadásától, az új megoldások hiteles

közvetítésétől. Törekszik az informatikai eszközök és szoftverek megismerésére és használatára. A szakterületén végzett munka során készségszinten ismeri és kezeli a szükséges számítógépes programokat. [8]

A mérnöknek nem csak kognitív és gyakorlati képességgel kell rendelkeznie, hanem szociális, kommunikációs, együttműködő, problémamegoldó valamint olyan magatartási komponensekkel, mint az egyéni attitűd vagy érzelmek. [6]

4 AZ OKTATÁS JELENE

Az egyetem oktatási struktúrája és jelenlegi gépparkja széles spektrumú interdiszciplináris képzés megvalósítását teszi lehetővé. Számos olyan gép áll a rendelkezésünkre, ami az elméleti ismeretek gyakorlati alkalmazásának bemutatását teszi lehetővé. A berendezéseket nem csak a képzés részeként, hanem kutatások és kísérletek megvalósítására is használják. A Bánki nagyműhelyében lévő forgácsológépek számos tantárgyat, kutatást, kísérletet és gyártási feladatot szolgálnak ki.

A szerszámgépek beszerzése az ipar fejlődésével párhuzamosan folyt, szem előtt tartva a berendezés korszerűségét és a hozzá társuló oktatás relevanciáját. Egy eszterga cella megvásárlása az NC-CNC technológia szélesebb körű oktatását teszi lehetővé. A képzési paletta kiterjesztésére további gépekkel bővült a Bánki gépparkja.

A következő gép egy Mazak Nexus410A-II függőleges megmunkáló központ, amin forgácsolási paraméterek mérése és forgácsoláskutatás folyik.

2005-ben bővült a repertoár egy 4 tengelyes hajtott szerszámos EuroTurn B12 típusú CNC esztergagép NCT2000-es vezérlővel (3. ábra). A gépet azonnal bevonták az oktatásba. Részbe volt a mérnök asszisztens gyakorlati képzésének és vizsgáztatási eljárásnak. Jelenleg egy szabadon választható tárgy szerves részét képezi.



3. ábra: EuroTurn 12B CNC esztergagép

Nem sokkal később érkezett egy viszonylag nagy teljesítményű és munkaterű egyszerű két tengelyes Dugard Eagle BNC 1800 típusú CNC esztergagép. Felépítését tekintve nagyon hasonló az egytengelyes esztergához, rendelkezik szegnyerrel. Ennek köszönhetően igen nagy méretű munkadarab biztonságos megmunkálását teszi lehetővé. Különlegessége, hogy a beépített kézi kerekekkel manuálisan mozgathatjuk a szánokat. Több tantárgy laborgyakorlatán a gépbe

szerelhető mérőeszközöknek köszönhetően forgácsolóerő valamint felületi érdesség mérés zajlik rajta. A következő beszerzés a CNC forgácsolás különleges darabja. 2016-ban meghoztak egy nagysebességű marógépet (HSC). A Körner CreativTec Magic 600 HSC CNC marógép felélesztése nehézkesen indult, de a hallgatók lelkes közreműködésével sikeresen megtörtént. A marógép helyreállításával Wéber József foglalkozott aki akkor még Mechatronikai mérnökhallgató volt, és TDK munkát, valamint szakdolgozatot készített a témából.

2017 őszén az amerikai Haas Automotion cég jóvoltából hozzájutottunk egy jelenleg is korszerűnek mondható háromtengelyes függőleges Haas MiniMill Edu CNC marógéphez (4. ábra) valamint 5 db Haas vezérlő szimulátorhoz. A kapott eszközöket a lehető leggyorsabban integráltuk az oktatásba. A CNC műhelygyakorlat tematikáját, ami az EuroTurn CNC esztergagéphez íródott, hozzá igazítottuk az új géphez. Ez kiváló lehetőséget teremtett a két technika beállítási folyamatainak összehasonlítására.



4. ábra: Haas MiniMill Edu CNC marógép

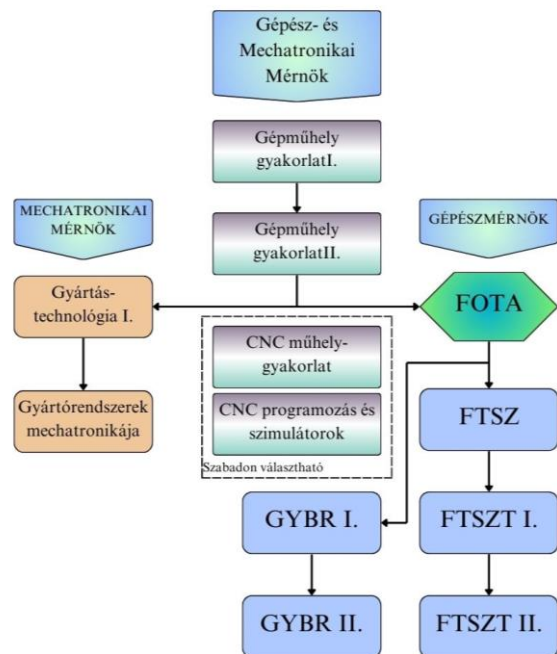
A vezérlő szimulátorok az FMS laborban kaptak helyet (5. ábra) a személyi számítógépek mellett. A szimulátoroknak köszönhetően a hallgatók, olyan folyamatokat tanulhatnak és gyakorolhatnak be, ami éles környezetben veszélyes lehet. A kurzus résztvevői a szimulátorokat az első alkalom után már önállóan tudták használni és akár a szabad idejükben is foglalkozhatnak vele.



5. ábra: Vezérlő szimulátorok az FMS laborban

A Haas CNC marógép technikailag felülmúlta az eddigi berendezéseket. Korszerű biztonságtechnikai megoldásokat alkalmaz, USB adatkapcsolatot használ, WIFI hálózaton keresztüli elérést biztosít, valamint lehetőség van mobil alkalmazással történő kezelésre. A gép rendelkezik a Renishaw cég által forgalmazott automatikus szerszám- és munkadarab- bemérő rendszerrel. Az oktatáson túl a Haas cég hatására létrehoztunk egy országos szintű versenyt, aminek része az összes Haas berendezés, ezek rendezvények, eseti bemutatók tartására, szakdolgozatok, TDK-k készítésére és egyetemi gyártásnak is teret adnak.

Az NC-CNC technológia elsajátításához és megértéséhez előismereteket kell szerezni. A témakör feldolgozásához több félévnyi tantárgy teljesítésére van szükség. A tantárgyak egymásra épülése elősegíti a hallgatók fejlődését és az adott szakterülethez tartozó kompetenciák minél hatékonyabb megszerzését. A képzési struktúrának (6. ábra) köszönhetően a hallgatók kellően megalapozva tudják elkezdni az NC technika alapjainak elsajátítását, valamint specializáció után magasabb szintű ismereteket szerezhetnek. A végzett CAD-CAM szakirányos mérnökök a 21. század kívánalmainak megfelelő készséget és képességet szereznek.



6. ábra: A képzés struktúrája

A gépészmérnök és mechatronikai képzésben résztvevő összes hallgató találkozik a Gépműhely gyakorlat I.-II. tárggyal, ahol megismerkednek a műhelyrendszerü szemlélettel és az általános baleset és munkavédelemmel. Elsajátítják az alapforgácsoló eljárásokhoz (esztergálás, marás, fúrás, stb.) tartozó szerszámgépek általános felépítését, működési elvét és az adott gépen végezhető műveleteket.

A gépészek következő, de még közös tárgya a Forgácsolástechnológia alapjai (FOTA). Ebben bemutatásra kerülnek a forgácsolás alapjelenségei,

energetikai folyamatai és a gazdaságos forgácsolás tervezésének alapösszefüggései. Áttekintést kapnak a forgácsolás alapváltozatairól, az alkalmazott szerszámokról. Ezen a szinten belép az NC-CNC, ismertetésre kerül a szerszámgépek csoportosítása és felépítési sajátosságai.

Következő a Forgácsolás Technológia (FTSZ), amely már a specializáció utáni szaktárgy. Feladata megismertetni a hallgatóval a forgácsolási folyamat legfontosabb jellemzőit és szemléltetni a legfontosabb eljáráshoz tartozó szerszámok választási- és tervezési alapelveit, valamint a szerszámozással és élezéssel kapcsolatos műszaki és gazdasági számításokat. Bemutatásra kerül a CNC-gépek felszerszámozásának számítógéppel támogatott folyamata.

A Forgácsolástechnológia számítógépes tervezése I.-II. (FTSZT) és a Gyártóberendezések és rendszerek I.-II. (GYBR) felsőbb évfolyamon párhuzamosan haladnak. Az FTSZT célja megismertetni a technológiai tervezés feladatait, elveit és módszereit, valamint a tipikus gépipari alkatrészek és felületek gyártását. Az első félév során megismerkednek a hallgatók a gépelemek gyártási eljárásaival. A gyakorlatok során a hallgatók elsajátítják az NC programozás alapjait, megtanulnak G-kódos programot írni. A következő félévben a hallgatók az NC programok automatikus generálásának lehetőségeivel ismerkednek meg, továbbá a szerelés tervezés feladataival és módszereivel. A hallgatók elsajátítják a CAM rendszerek használatának legfontosabb ismereteit, megismerkednek a CAM rendszerek funkcióival, osztályozásával, a CAM munkafolyamat lépéseivel, valamint a leggyakrabban használt mozgásciklusok sajátosságaival és alkalmazásával.

A GYBR bemutatja a forgácsoló és kiszolgáló szerszámgépek és ipari robotok szerkezeti felépítését és működését. Ismerteti, hogyan határozzuk meg az adott technológiai feladathoz tartozó gépkiválasztási és gépbeállítási paramétereket. A hallgatók találkoznak a gazdaságos üzemeltetés alapvető kérdéseivel és a gépkarbantartás feladataival. Elsajátítják a speciális célgéptervezés folyamatát valamint megismerkednek a szerszám-gépekben használt speciális működtetésű hidraulikus, pneumatikus és vákuumrendszerek működésének és karbantartásának elvével. A képzés során bemutatásra kerül a megmunkáló- és esztergáló-központok, gyárcellák rugalmas gyártórendszerek és rekonfigurálható rendszerek működése és az egymással való kommunikációja. A hallgató képet kap a szerszámgépekben és ipari robotokban használt villamos hajtások, hajtási stratégiáik és vezérlés lehetőségekről. [8]

A hallgatói igények kielégítésére és a gyakorlatorientált képzés erősítésére létrehoztuk a CNC műhelygyakorlat és a CNC programozás és szimulátorok nevű szabadon választható tárgyakat. [8]

CNC műhelygyakorlat célja: a CNC technológia gyakorlati alkalmazásának megismerése, a CNC esztergagépen és CNC marógépen történő alkatrész gyártási folyamatának elsajátítása, az ismétlődő folyamatok algoritmizálása. A hallgatók megismerik az NCT104-es és HAAS vezérlők alapvető működését, kezelését. Elsajátítják a CNC programozásban leginkább alkalmazott ciklusokat. Megtapasztalják a gyártást megelőző beállítási folyamatokat, kipróbálhatják a

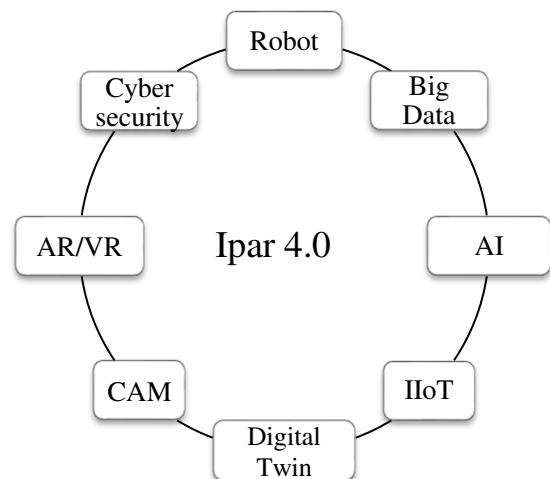
munkadarab- és szerszám- bemérés folyamatát. Részt vesznek egy alkatrész gyártásában.

CNC programozás és szimulátorok célja: Az iparban alkalmazott CNC-megmunkáló program készítésének folyamatát leegyszerűsítő, a műhelyszintű kézi programozást támogató, párbeszéd alapú vizuális programozási környezetek megismertetése, alkalmazása (HAAS, Sinutrain). CNC forgácsoló gépek virtuális munka környezetét modellező szoftverek bemutatása (CNC szimulátorok). Szimulációs környezetben történő program futtatás ismertetése, bemutatása. MTS szimulációs szoftver további szolgáltatásainak bemutatása. MTS szimulációs szoftver eszterga-, maró- és CAM-modulok bemutatása, alkalmazása. CNC megmunkáló programok készítése Siemens, NCT, MTS rendszerben.

5 JÖVŐKÉP

A képzés fejlesztési irányát a kiszolgált ipar változásai határozzák meg. A legnagyobb ütemű átalakulást a számítástechnika fejlődése indukálja, ami az élet minden területére kihat. Hatást gyakorol az ember magánéletére, személyes környezetére, a munkaerőpiac átalakulására, az oktatásra, a tanulásra és a különböző iparágakra. Az ipar számos ágában jelen van az NC-CNC technológia. E technológia és a hozzá tartozó területek gyorsan fejlődnek, amivel a képzésnek is lépést kell tartani. Okai között megtaláljuk az Ipar 4.0 paradigmáit, a magas fokú automatizáltság elvárását és a Mesterséges Intelligencia (MI) széleskörű elterjedését.

Az Ipar 4.0 kilenc alappillérrel rendelkezik (7. ábra). Törekvései között szerepel, hogy intelligens gyárat hozzon létre. Egy másik elképzelés, hogy a vevők egyedi igényeinek rugalmas és magas színvonalú kielégítése a tömegtermelés feltételei mellett történjen. [15] Ez az egyéniesített tömegtermelés elve. A gondolat az, hogy nem készletre, hanem vevői megrendelésre történik a gyártás. Az Ipar 4.0 létrehozza az emberek és objektumok és a rendszerek közötti kapcsolatot. A fenntartható magas színvonalú irányítás eszköze a mindenre kiterjedő kontroll.



7. ábra: Ipar 4.0 kilenc alappillére

A nagyfokú robotizáció az Ipar 4.0 egyik legfontosabb alappillére. A robot az emberrel szemben képes a folyamatos, pontosabb és hatékonyabb munkavégzésre. A gyártás területén olyan kiszolgáló robotokat alkalmaznak,

amelyek egyszerre több állomáshelyet képesek hatékonyan kiszolgálni. A robotok tevékenysége folyamatosan monitorozva van. A robotrendszerekből érkező dinamikus adatokat, törzsadatokat, gyártási adatokat, szolgáltatási adatokat a Big Data technológia használatával össze lehet vetni és elemezni. Ezen adatok feldolgozásával, elemzésével tovább optimalizálhatjuk a gyártást. A mesterséges intelligencia (AI) használata lehetővé teszi, hogy az ember számára nehezen feldolgozható adatmennyiségből az összefüggéseket viszonylag rövid időn belül kielemezze, és bonyolult folyamatokat automatizáljon.

A gyártás digitalizációja során az Ipar 4.0 létrehozza az emberek az objektumok és a rendszerek közötti kapcsolatot. A dolgok internete (IoT) hálózatba kapcsolja a partnereket és ügyfeleket, valamint a gyártás egységeit (gépeket, robotokat, folyamatokat). A kapcsolat adatait digitálisan rögzítik és kezelik. Az angol nyelvterületeken a szakértők az Ipar 4.0 helyett az dolgok internete (IoT Internet of Things) kifejezést használják. Az így előállított adatmennyiséghez gyakran kevés a meglévő adatátviteli sebesség és sávszélesség, ezért az 5G kiépítése is szükségsszerűvé vált. Az 5G nagyobb sávszélességet, így megbízhatóbb adatátvitelt biztosít.

Az adatok digitalizálása és megosztása komoly kiberbiztonsági (Cybersecurity) kockázatot jelent. A nagy adathalmazok, a dolgok internete az ipari digitalizáció növekedése egyre sebezhetőbbé teszi a rendszert. A jogosulatlan hozzáférés következménye lehet bizalmas adatok nyilvánosságra hozatala, információk módosítása vagy megsemmisítése és a hozzáférés megakadályozása. [14]

Az Ipar 4.0 célja az okos gyárak létrehozása a meglévő hagyományos módon működő gyártóüzemek átalakításával. Ebben fontos szerepet tölt be a számítógéppel támogatott gyártás (CAM, Computer Aided Manufacturing), ami azt jelenti, hogy a gyártási folyamatot számítógép által vezérelt CNC-gépek használatával automatizálják. Egy CNC esztergagép és egy robot párosítása az első lépés az automatizálás felé. A 3D-nyomtatás (additív eljárás) is a modern gyártási eljárások közé sorolható. A CNC szerszámgépek programozását egyszerűbb alkatrész esetén emberi programozó végzi, de bonyolultabb geometriánál egy CAM program segítségével generálják a megmunkáló programot. A CNC gépen történő futtatás előtt a program helyességéről meg kell győződni, mert ellenkező esetben komoly károkat képes okozni. Erre szolgálnak a szimulációs szoftverek, ahol megjelenítjük az adott CNC szerszámgép belső munkaterét és leteszteljük a folyamatot.

Ezekben a szimulációs szoftverekben az Ipar 4.0 lehetőséget teremt arra, hogy létrehozzunk egy digitális ikret (Digital Twin) a gyártási folyamatba résztvevő berendezésről, eszközökről, alkatrészekről, így minden a gyártás szempontjából fontos részlet leképezésre kerül. A tervezés a tesztelés és optimalizálás a valós gyártástól függetlenül virtuálisan történhet. A számítógép által létrehozott virtuális valóságban (VR, Virtual Reality) és kibővített valóságban (AR, Augmented Reality) valós időben irányítható a vizualizált információ, ami lehet kép, videó, szöveg vagy virtuális objektumok. [11] [12] [13]

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] <https://bu.hu.museum-digital.org>
- [2] <https://galeriasavaria.hu>
- [3] <https://www.istockphoto.com>
- [4] https://real-eod.mtak.hu/1914/1/SZTAKITanulmányok_018.pdf
- [5] Fekete Bendegúz (2016). EMCO Compact 5 CNC esztergagép továbbfejlesztése *Szakedolgozat*
- [6] https://janus.ttk.pte.hu/tamop/tananyagok/curriculum/iii_1__a_kompetencia_sz_jelentse.html
- [7] Falus Iván (2003). Didaktika *Nemzeti tankönyvkiadó*, Bp. 2003
- [8] Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar (2022). Képzési program
- [9] <https://industry4.hu/hu/ipar4>
- [10] PEREIRA, A.C. and ROMERO, F., (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, 13, pp. 1206-1214.
- [11] FÜLEP, I., NICK, G.A. and VÁRGEDŐ, T., 2018. Zászlón a digitalizáció-Ipar 4.0. *Új Magyar Közigazgatás*, 11(2), pp. 45-55.
- [12] <https://www.kuka.com/hu-hu/future-production/ipar-4-0>
- [13] <https://www.microsourcing.com/learn/blog/what-is-industry-4-0-the-ultimate-guide>
- [14] https://www.eca.europa.eu/sites/cc/Lists/CCDocuments/Compendium_Cybersecurity/CC_Compedium_Cybersecurity_HU.pdf
- [15] <https://perepo-dolgozat.uni-pannon.hu/id/eprint/4877/>

Folyamatbiztonság javítása a hajógyártásban

Improving Process Safety in Shipbuilding

Dr. Czifra György

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, Város,
czifra.gyorgy@bkg.uni-obuda.hu

Összefoglalás — A 90-es évek elején, a Szovjetunió felbomlása miatt elvesztett keleti piac után, a Szlovák Hajógyár Komárno (SLK a.s. Komárno) stratégiai célja az volt, hogy a nyugati piacra való átállás mellett a termékek irányultságát is megváltoztassa, a folyami hajókról a folyami-tengeri, végül pedig a tengeri teherhajókra. Ezzel egyidejűleg a sorozatgyártásról az egyedi és kis sorozatú gyártásra tértek át. Cikkünkben ezt a jelentős változást elemezzük a hajógyári folyamatok biztonságának emelése érdekében tett lépések tükrében. Az SLK a.s.-nél a folyamatok biztonságos lefolyása szükségessé tette az új hajók fejlesztésének, valamint a konstrukciós gyártási dokumentáció elkészítésének felgyorsítását. Emiatt az SLK a.s. vezetése úgy döntött, hogy speciális 3D CAD rendszereket vásárolnak az elektronikus modell létrehozása céljából, valamint az azt követő gyártási dokumentáció elkészítéséhez.

Kulcsszavak: folyamatbiztonság, hajógyártás, 3D CAD, modellezés, innováció, versenyképesség

Abstract — In the early 1990s, after losing the eastern market due to the dissolution of the Soviet Union, the strategic goal of the Slovak Shipyard Komárno (SLK a.s. Komárno) was to transition to the western market and change the focus of its products from river ships to river-sea and eventually sea cargo ships. Simultaneously, they shifted from mass production to custom and small series production. In this article, we analyze this significant change in light of the steps taken to improve the safety of shipyard processes. At SLK a.s., ensuring the safe execution of processes necessitated accelerating the development of new ships and the preparation of construction manufacturing documentation. Therefore, the management of SLK a.s. decided to purchase specialized 3D CAD systems for creating electronic models and subsequently preparing manufacturing documentation.

Keywords: process safety, shipbuilding, 3D CAD, modelling, innovation, competitiveness

1 BEVEZETÉS

A 90-es évek elején, a Szovjetunió felbomlása miatt elvesztett keleti piac után, a Szlovák Hajógyár Komárno (SLK a.s. Komárno) stratégiai célja az volt, hogy a nyugati piacra való átállás mellett a termékek irányultságát is megváltoztassa, a folyami hajókról a folyami-tengeri, végül pedig a tengeri teherhajókra. Ezzel egyidejűleg a sorozatgyártásról az egyedi és kis sorozatú gyártásra tértünk át.

Ez a jelentős változás az SLK a.s.-nél szükségessé tette az új hajók fejlesztésének, valamint a konstrukciós gyártási dokumentáció elkészítésének felgyorsítását.

Emiatt az SLK a.s. vezetése úgy döntött, hogy speciális 3D CAD rendszereket vásárolnak az elektronikus modell létrehozása céljából, valamint az azt követő gyártási dokumentáció elkészítéséhez, kiemelt figyelemmel a hajótest és a csővezeték rendszerek területén, amelyek akkoriban – napjainkban nemkülönben - a legproblémásabb részek voltak.

1991-ben megkezdődött a konstrukciós osztályok technikai felszerelésének modernizálása. Az akkori műszaki igazgató Radi Bertalan mérnök Dr. Czifra Györgyöt bízta meg a modernizációs folyamat irányításával. A legmodernebb számítógépes és szoftveres felszerelés beszerzésével a dokumentáció előkészítési ideje az eredeti 24 hónapról 9 hónapra, a hajó építési ideje pedig 18 hónapról 12 hónapra csökkent. Ezt az acélszerkezet és a csővezeték rendszerek 3D számítógépes modellezésének és a térbeli modellből készített gyártási dokumentáció bevezetésével értük el.

2 A BESZERZÉSI FOLYAMAT

A 3D CAD rendszerek, mint a konstrukciós dokumentáció készítésének alapvető rendszereinek bevezetési folyamata az alábbi időrendben látható:

- 1991-92: Piackutatás és kiválasztási eljárás
- 1992: 10 grafikus munkaadó szállítása, szoftver (BMT, CADMATIC) telepítése, felhasználók képzése, szoftver SLK a.s. feltételeihez való igazítása, adatbázis létrehozása és kiegészítése
- 1993: Rutin üzem - NL WESER projekt
- 1994: A BMT-t megvásárolta a Kockums cég, új rendszerek (NAPA és NUPAS) kiválasztása, NL ELBE projekt
- 1995: A munkaadók számának bővítése 10-ről 23-ra, memóriakapacitás bővítése, akkumulátoros áramforrások és nagykapacitású optikai memóriaegység kiegészítése, NL SCHELDE projekt
- 1996: Rutin üzem - NL LEDA és NL DANUBIUS projektek
- 1997: Rutin üzem - NL LEDA és NL VEGA projektek
- 1998: További grafikus munkaadók bővítése 2 szerverrel, memória és merevlemezkapacitás bővítése, PC-k grafikus terminálként való használatának megoldása, grafikus munkaadó SAP R/3 és Office munkára való használatának megoldása, NL ROSTOCK 1601, NL LEDA 1105, NL BALTIC 5101, NL LEDA 1901 projektek.

A következő áttekintés bemutatja a 3D CAD rendszerek bevezetésére fordított beruházásokat a tervezési osztályon:

1. táblázat: A beruházások időrendje

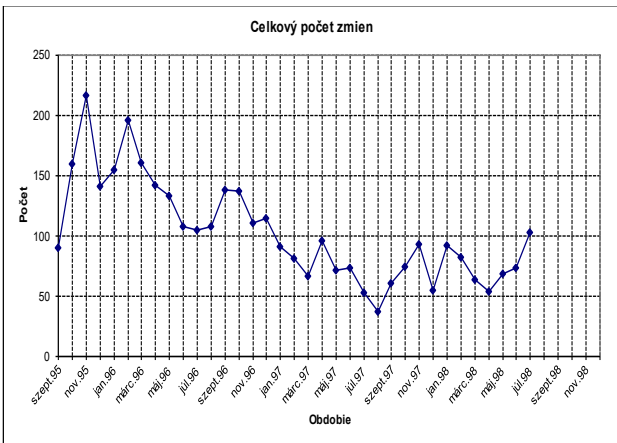
HARDWARE	1992	1994	1995	1996	1997
Plant Model. Syst. munkahelyek	2,90				
CADMATI, NUPAS munkahelyek			6,10		
NAPA munkahelyek			1,40		
PC, laptop, printer, plotter			4,70		
PC, printer, EPLAN			3,70		
HP munkaállomások					3,50
Összesen mil. Sk	2,90	0	15,90	0	3,50

SOFTWARE	1992	1994	1995	1996	1997
Plant Modeling System	11,60				
AutoCAD		0,24			
FastCAD		0,14	0,02		
CADMATI			2,80		
NUPAS			13,70		
NAPA			4,10		
Összesen mil. Sk	11,60	0,38	20,60	0,02	0

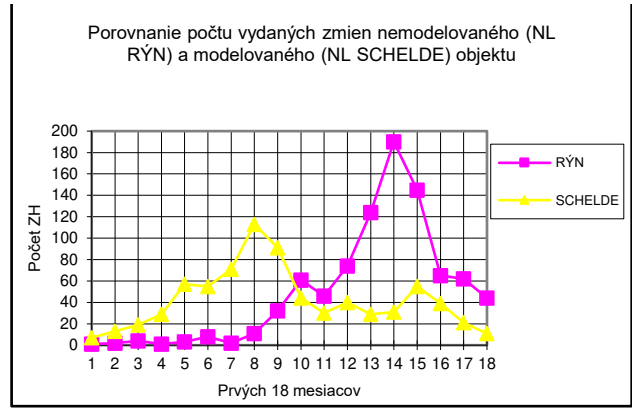
ÖSSZESEN mil. Sk	14,50	0,38	36,50	0,02	3,50
-------------------------	--------------	-------------	--------------	-------------	-------------

A NUPAS-CADMATI 3D CAD rendszerek használatának előnyei a kézi tervezéshez képest a következőkben foglalhatók össze:

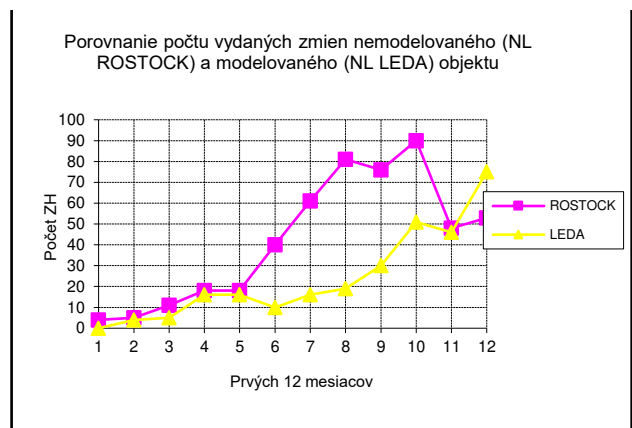
1. A tervezési dokumentáció elkészítési idejének körülbelül 1 évvel történő csökkenése.
2. A megvalósított változtatások számának csökkenése a tervezési fázisban megoldott több műszaki probléma miatt.
3. A gyártási dokumentáció áttekinthetősége és a hibák kiküszöbölése.
4. A szükséges anyag pontosabb meghatározása.
5. A Konstrukció főosztály Csővezetékrendszerek osztálya által kiadott változtatási jelentések számának összehasonlításával kimutatható a modellezett és nem modellezett objektumok gyártási költségeinek különbsége.



1. ábra: Az összes kiadott változás száma (Darab/Időszak)



2. ábra: Az NL RYN (nem modellezett) és az NL SCHELDE (modellezett) hajókra kiadott változások számának összehasonlítása (Változások száma/Első 18 hónap)



3. ábra: Az NL ROSTOCK (nem modellezett) és az NL LEDA (modellezett) hajókra kiadott változások számának összehasonlítása (Változások száma/Első 12 hónap)

A NAPA, NUPAS és CADMATI rendszerek a tervezési osztályon napi 24 órában működtek, mivel az indítás, konfigurálás, beállítás és leállítás naponta körülbelül 1,5 órát vett igénybe. Minden egyes bekapcsolással és kikapcsolással csökkent ezeknek az eszközöknek az élettartama. A rendszer napi 24 órás működtetésének szükségessége abból is adódott, hogy a biztonsági mentés éjszaka, automatizáltan, emberi beavatkozás nélkül történt, amikor a rendszerrel nem dolgoztak.

A csővezeték rendszerek és a hajótest acélszerkezeti osztály kapacitás számításai és elemzése azt mutatták, hogy ha a jelenlegi állapotot konzerválják, a tervezési osztályra vonatkozó követelményeket az 1999-es új projektek tekintetében nem lehet teljesíteni. A helyzet kritikus volt a NUPAS program szempontjából is, mivel 1999 végén lejárt a program használatának lehetősége. Ez a verzió nem támogatta az átmenetet 2000 évre, és az akkori számítógépek operációs rendszere sem volt többé támogatott az operációs rendszer gyártója által. Az operációs rendszer frissítése az alkalmazott verzióról az új verzióra elengedhetetlen volt az adat- és programkompatibilitás biztosítása, valamint az új generációs operációs rendszer új lehetőségeinek kihasználása érdekében.

1998-ban két nagy teljesítményű grafikus munkaállomást vásárolt a gyár. Ez lehetővé tette a CADMATIC programmodul területén az operációs rendszer HP UX 10.20 verziójára, valamint a CADMATIC újabb, 4.0.0 verziójára való áttérést. Ez a követelmény nemcsak a rendszer felhasználói részéről merült fel – új, összehasonlíthatatlanul bonyolultabb projektek, a feldolgozott komponensek számának ugrásszerű növekedése –, hanem a szoftverszállító részéről is. Ez a technológiai változás a NUPAS és NAPA szoftverrendszerek esetében is elengedhetetlen volt, mivel az akkori verziókat a szoftverszállítók már nem támogatták, ami problémákat okozott különösen azokban a részekben, ahol a programot vagy az adatbázist saját igényeink szerint módosítottuk. Négy nagy teljesítményű Hewlett Packard munkaállomás és a meglévő munkaállomások operatív memóriájának bővítése biztosította a szükséges kapacitást az adatok köztes tárolásához, valamint felgyorsította az egész számítógépes hálózat működését a merevlemezek gyorsabb elérésével és rövidebb hozzáférési idővel.

Az új háttértárolók hozzáadásával megszűnt az adatok elvesztésének fenyegetése a program váratlan leállása miatt, amelyet a több felhasználó által megosztott lemezkapacitás elégtelensége okozott. Az adatmennyiség az említett két év alatt 230 MB/projektől 1,3 GB/projektre nőtt a CADMATIC részéről, ami 560%-os növekedést jelentett egy projekt esetében. A NUPAS esetében az operatív memória és a processzorok sebességének növelése hasonlóan szükséges volt, például: NL LEDA projekt – 600 MB, míg az NL BALTIK projekt már 900 MB. Ugyanebben az időszakban négy projekten kellett dolgozni: NL BALTIK 5101, NL LEDA E3 1901, NL LEDA E3 1903 NSI, NL ROSTOCK 1601 NSI, valamint az ötödik, az NL SCHELDE – a gyártásának koordinálása és az ügyfél további igényeinek teljesítése volt aktuális. A munkaállomások számának növelésével szükségessé vált a használt szoftverlicenck számának növelése is, mivel az eredeti mennyiség már nem tette lehetővé a munkaállomások teljes kihasználását, és nem tette lehetővé több munkatárs részvételét a számítógépes modell létrehozásában és az abból közvetlenül nyert gyártási dokumentáció elkészítésében sem. A kommunikációs igények növekedése miatt az ETHERNET szegmens kapacitását 10 Mb/s-ról 100 Mb/s-ra növeltük. Az eszközök felhasználását már az új munkaállomások számával terveztük, nemcsak az acélszerkezetek, a csövezetékek, hanem az elektromos kábelvezetékek, a lakóterek, a hajózási stabilitási számítások és a főtervezők munkájának támogatása területén is. A fentiek alapján az egyetlen lehetséges megoldás a tervezési és gyártási dokumentáció elkészítésének biztosítására a kínált technika és szoftver gyors beszerzése és a megfelelő működési feltételek biztosítása volt. Mivel nem minden tervezési osztály volt megfelelően és azonos szinten felszerelve úgynevezett nagy CAD rendszerekkel, szükségessé vált a munkaállomások bővítése nemcsak a számukban, hanem a progresszív szoftvereszközökkel való felszereltségükben is.

Természetesen abban az időben nem volt könnyű pontosan megbecsülni a fent említett eszközök fejlesztésének költségeit, ennek ellenére szükséges volt a munkaállomások bővítésének költség- és időbeli horizontjainak megtervezése. Az alábbi táblázatban

látható a nagy CAD rendszerek bevezetésének akkori várható fejlődése.

2. táblázat: A CAD rendszerek tervezett innovációja

Év	1998	1999	2000	2001	2002	össz.
A CAD 3D munkahelyek száma		29	40	48	57	
A CAD 2D munkahelyek száma		30	45	55	60	
A dokumentációkészítésben való részvétel mértéke	65%	50%	75%	85%	90%	
A 3D munkahelyekre fordított beruházás értéke mil. Sk		8,60	16,5	12,0	13,5	50,6
A 2D munkahelyekre fordított beruházás értéke mil. Sk		4,80	2,40	1,60	0,80	9,60
ÖSSZESEN mil. Sk		13,4	18,90	13,60	14,30	60,20

A hardverre és szoftverre szükséges teljes beruházás körülbelül 60,2 millió Sk-ra becsültük. A szükséges költségek kiszámításakor az aktuális árakat vettük figyelembe. Az egyes értékeket globálisan becsültük meg, azaz minden 3D és 20 munkaállomás esetében a hardver és szoftver integrálva volt az árban. A grafikus munkaállomások fokozatos felszerelésével lehetővé vált a hajók 3D modelljeinek elkészítése a tervezési osztály többi részlegén is, ami jelentős mértékben megmutatkozott a tervezők munkájának gyorsaságában és minőségében. A NUPAS és CADMATIC rendszerek előnyei végső soron kézzelfoghatóak voltak a tervezési dokumentáció készítésének egyéb területein is.

Természetesen a további fejlődéshez elengedhetetlen, hogy elérjük azt az állapotot, amelyben lehetőség van az egész hajó összes csövezeték rendszerének párhuzamos feldolgozására, és amelyben az acélszerkezet modelljének készítése során interaktívan kommunikálhatunk az acélszerkezet készítésére szolgáló rendszerrel, és a változtatásokat még az elektronikus modell szakaszában végrehajthatjuk. A 2D CAD rendszer azokra a területekre fókuszált, ahol nem volt szükség modellezésre, valamint a gyártási dokumentáció operatív frissítésére változások esetén.

A neves cégek által végzett költségelemzés azt mutatja, hogy a hibák eltávolításának költségei a projekt különböző szakaszaiban a következőképpen alakulnak: ha a hiba eltávolításának költségeit a projekt szakaszában 10 egységre becsüljük, akkor a konstrukciós feldolgozás szakaszában ugyanazon hiba eltávolítása 100 egység, a technológiai feldolgozás szakaszában 1 000 egység, a gyártási szakaszban 10 000 egység, az üzemeltetési tesztek szakaszában 100 000 egység, és a megvalósítás utáni szakaszban már 1 000 000 egység.

Ezek az értékek egyáltalán nem túlzóak, elég elemezni néhány hibát, amelyeket a garancia keretében külföldi kikötőkben kellett kijavítani a hajókon. Az előző megfontolások szerint a tökéletes műszaki előkészítés rendkívüli jelentőséget nyer, különösen a felesleges hibák kijavításának költségeinek megtakarítása terén, amely hibákat a grafikus munkaállomások alulméretezett száma és az ebből adódó elégtelen műszaki előkészítési idő okozott.

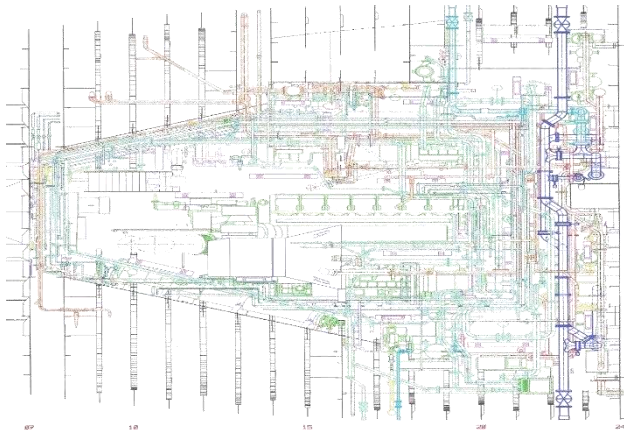
Egy másik nagyon fontos terület és méltatlanul elfeledett probléma a legmagasabb kategóriájú számítógépek környezete és működési feltételei. Ezeknek a munkaállomásoknak extrém teljesítményű processzorai

olyan mennyiségű hőt termelnek, ami súlyos károkat okozhat a számítógépben. A normál működéshez léghűtött és pormentes környezetet kell biztosítani. Ezért úgy döntöttünk, hogy egy kisebb teljesítményű munkaállomást "feláldozunk", és az optikai biztonsági mentési egységgel együtt az adatközpontba helyezzük, ahol legalább részben biztosított a pormentes környezet. Ez azonban nem oldotta meg maguknak a munkaállomásoknak a problémáját. Komoly gondot jelentett az is, hogy a munkaállomások elhelyezésére szolgáló objektum tűzvédelme nem volt megfelelő. A fent említett okok miatt a számítógépeket éjszákára nem kapcsoltuk ki, ami növelte a tűz keletkezésének veszélyét. Ezért a lehető legrövidebb időn belül meg kellett oldani a folyamatosan működő számítástechnikai helyiségek tűzjelző rendszerének problémáját.

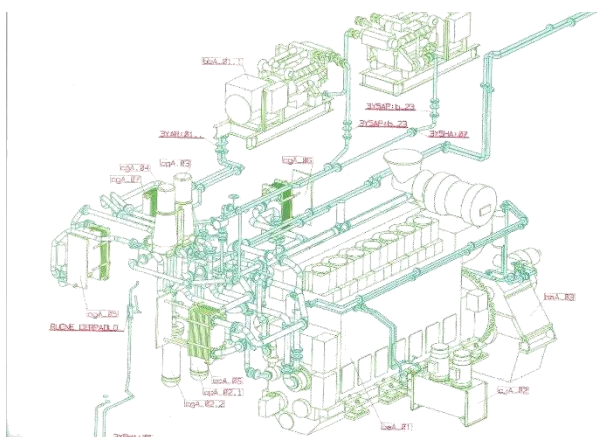
Az elemzés után kiderült, hogy az új modern technológiák bevezetésének valódi előnyei a műszaki előkészítésben a következők:

- Termékfejlesztési idő - csökkenés 30-70%-kal
- Szükséges konstrukciós változtatások - csökkenés 65-90%-kal
- Termék piacra kerülési ideje - csökkenés 20-90%-kal
- Általános minőség - növekedés 200-600%-kal
- Munkatermelékenység, hatékonyság - növekedés 20-110%-kal
- Vállalati forgalom - növekedés 5-50%-kal

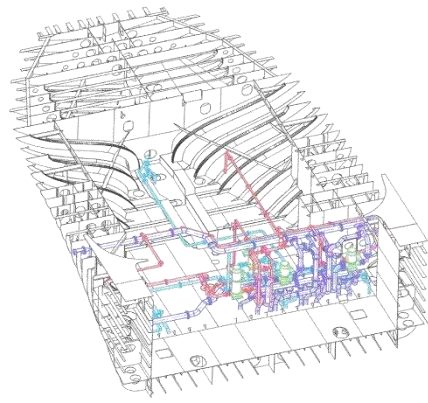
Végezetül bemutatunk néhány képet a sikeresen alkalmazott megoldás illusztrálására.



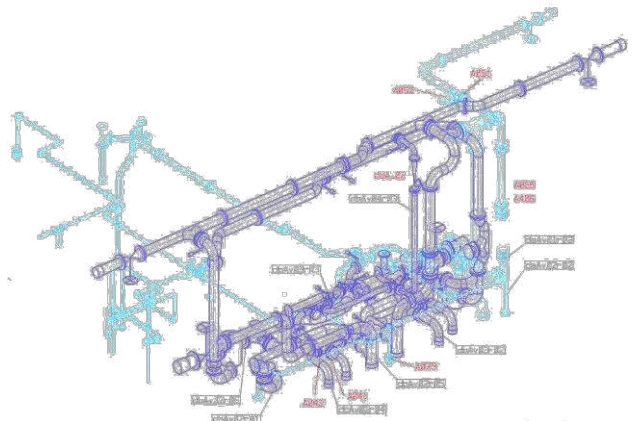
4. ábra: Tengerjáró teherhajó gépterme



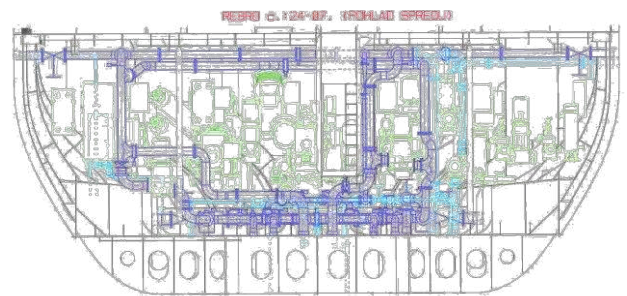
5. ábra: Tengerjáró teherhajó főgépe, segédgépei és hűtővíz rendszere



6. ábra: Tengerjáró teherhajó gépterme és acélszerkezeti modellje



7. ábra: Tengerjáró teherhajó ballasztvíz és fenékvíz rendszere



8. ábra: Tengerjáró hajó bordametszeti nézete, a 24-07 bordák közötti szelvény részlete előlről nézve

3 A FOLYAMATBIZTONSÁG KULCS-TECHNOLÓGIÁI

Az eddigiekből látható, hogy a hajógyártásban a folyamatbiztonság javítása kulcsfontosságú a hatékonyság és a minőség biztosítása érdekében. Az SLK a.s. a 90-es évek elején kezdte meg a technikai felszerelés modernizálását, beleértve a 3D CAD rendszerek bevezetését, ami jelentős mértékben növelte a tervezők munkájának gyorsaságát és minőségét. Az új technológiák bevezetése lehetővé tette a hajók 3D modelljeinek elkészítését, ami csökkentette a dokumentáció előkészítési idejét 24 hónapról 9 hónapra, és a hajó építési idejét 18 hónapról 12 hónapra.

A modernizáció során két nagy teljesítményű grafikus munkaállomást vásároltunk, ami lehetővé tette a

CADMATIC és más rendszerek újabb verzióra való áttérést. Ez a technológiai változás elengedhetetlen volt a NUPAS és NAPA szoftverrendszerek esetében is, mivel az akkori verziókat a szoftverszállítók már nem támogatták. Az új technológiák bevezetésének eredményeként a termékfejlesztési idő 30-70%-kal, a szükséges konstrukciós változtatások száma 65-90%-kal csökkent, és az általános minőség 200-600%-kal nőtt.

A számítógépek éjszakai kikapcsolásának elkerülése érdekében szükségessé vált a tűzjelző rendszer telepítése, mivel a számítógépek folyamatos működése növelte a tűz keletkezésének veszélyét. A grafikus munkaállomások fokozatos felszerelésével lehetővé vált a hajók 3D modelljeinek elkészítése a tervezési osztály többi részlegén is, ami jelentős mértékben megmutatkozott a tervezők munkájának gyorsaságában és minőségében.

A folyamatbiztonság javítása érdekében fontos volt a munkaállomások számának növelése és a szoftverlicencek számának bővítése is, hogy több munkatárs vehessen részt a számítógépes modell létrehozásában és az abból közvetlenül nyert gyártási dokumentáció elkészítésében. Az új technológiák bevezetésének eredményeként a termék piacra kerülési ideje 20-90%-kal csökkent, a munkatermelékenység és hatékonyság 20-110%-kal nőtt, és a vállalati forgalom 5-50%-kal emelkedett.

A modernizáció során az operációs rendszer frissítése is elengedhetetlen volt az adat- és programkompatibilitás biztosítása érdekében. Az új háttértárolók hozzáadásával megszűnt a hibák elkövetésének és az adatok elvesztésének lehetősége a program váratlan leállása miatt. Az új technológiák bevezetése lehetővé tette a hajók 3D modelljeinek elkészítését, ami csökkentette a dokumentáció előkészítési idejét és növelte a tervezők munkájának gyorsaságát és minőségét.

4 ÖSSZEFOGLALÁS

Összegezve a cikkünkben tárgyalt folyamatok eredményét elmondhatjuk, hogy

1. Az SLK a.s. a 90-es évek elején a nyugati piacra való átállás mellett a termékek irányultságát is megváltoztatta, a folyami hajókról a tengeri teherhajókra.

2. 1991-ben megkezdődött a konstrukciós osztályok technikai felszerelésének modernizálása, beleértve a 3D CAD rendszerek bevezetését.

3. A modernizáció eredményeként a dokumentáció előkészítési ideje 24 hónapról 9 hónapra, a hajó építési ideje pedig 18 hónapról 12 hónapra csökkent.

4. 1998-ban két nagy teljesítményű grafikus munkaállomást vásároltak, ami lehetővé tette a CADMATIC és más rendszerek újabb verzióra való áttérést.

5. A grafikus munkaállomások fokozatos felszerelésével lehetővé vált a hajók 3D modelljeinek elkészítése a tervezési osztály többi részlegén is.

6. Az új technológiák bevezetése jelentős mértékben növelte a tervezők munkájának gyorsaságát és minőségét.

7. A NUPAS és CADMATIC rendszerek előnyei kézzelfoghatóak voltak a tervezési dokumentáció készítésének egyéb területein is.

8. A számítógépek éjszakai kikapcsolásának elkerülése érdekében szükségessé vált a tűzjelző rendszer telepítése.

9. Az új technológiák bevezetésének eredményeként a termékfejlesztési idő 30-70%-kal, a szükséges konstrukciós változtatások száma 65-90%-kal csökkent.

10. Az általános minőség 200-600%-kal, a munkatermelékenység és hatékonyság 20-110%-kal, a vállalati forgalom pedig 5-50%-kal nőtt.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Ján Chovan: Námornou loďou z Komárna do Istambulu, 2020, Micropont Nyomdaipari Kft. Tatabánya, ISBN 978-80-570-2171-1
- [2] Ján Chovan: Tengerjáró hajóval Komárnóból Isztambulba, 2021, Micropont Nyomdaipari Kft. Tatabánya, ISBN 978-80-570-3036-2
- [3] Ján Chovan: Bola raz jedna lodenica a potom ešte jedna..., 2024, Nec Arte s.r.o., Komárno, ISBN 978-80-570-5799-4
- [4] Boross István: Hajóépítés és javítás Komáromban, 2020, magánkiadás
- [5] Slovenské lodenice Komárno – 100 rokov stavby lodí, 1998, firemné vydanie
- [6] Process Safety | Schneider Electric Magyarország. <https://www.se.com/hu/hu/work/solutions/safety/process-safety.jsp>.
- [7] Hajóipar - Sika. <https://hun.sika.com/hu/ipari-ragasztastechnika/hajoiipar.html>.
- [8] História technického kreslenia - CAD-systémy (v rokoč) :). <https://encyklopediapoznania.sk/clanok/7825/historia-technickeho-kreslenia-cad-systemy-v-rokoch?pdf=true>.
- [9] Úvod do CAD/CAM: Vývoj, silné stránky a vplyv na priemysel. <https://www.want.net/sk/introduction-to-cad-cam-development-strengths-and-industry-impact/>.
- [10] Systém CAD: vytváranie účel, zloženie a štruktúru - ATOMIYME.COM. <https://sk.atomyime.com/system-cad-vytvaranie-ucel-zlozenie-a-strukturu/>.
- [11] Praktický príklad na uplatnenie superodpočtu výdavkov (nákladov) <https://www.podnikajte.sk/assets/prilohy-v-clankoch/2021-11-09-priklad-uplatnenie-superodpocetu-vydavkov-na-investicie.pdf>.
- [12] Návrh a konštrukcia strojov - CAD a CAM systémové riešenia. <https://www.drvice.net/konstrukcia-a-navrh-strojov/>.
- [13] Solid Edge pre modernú konštrukciu - SOVA Digital. <https://sova.sk/solid-edge-pre-modernu-konstrukciu/>.
- [14] CAD systémy - CAD Architecture. <https://www.cadsystemy.sk/cad-architecture.xhtml>.
- [15] Superodpočet výdavkov (nákladov) na investície od 1.1.2022. <https://www.podnikajte.sk/dan-z-prijmov/superodpocet-vydavkov-na-investicie-2022>.
- [16] Počítačová podpora výrobných technológií - stuba.sk. https://www.mtf.stuba.sk/sk/uchadzacov/prijimacie-konanie-na-bakalarsky-stupen-studia/pocitacova-podpora-vyrobnych-technologii.html?page_id=14067.
- [17] NOVÉ TRENDY VO VÝVOJI RIADIACICH SYSTÉMOV CNC OBRÁBACÍCH CENTIER A <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/43-2021/pdf/057-060.pdf>.

Veterán-gépjármű restaurátor szakmérnök képzés az Óbudai Egyetemen

Veteran vehicle restorator engineering training at Óbuda University

Hervay Péter

Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Kar, Budapest, Magyarország

hervay.peter@bgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás — A veterán gépjárművek restaurálása mindig aktuális téma marad, mivel a múltban gyártott járművek a múltbeli mérnöki megoldásokat mutatják be, amik sokszor megelőzték az adott kort. Ezek a járművek nemcsak egy adott kor technológiáját tárják elélnk, hanem annak az kornak az esztétikai irányzatát, vagy az adott konstrukció azon egy túlmutató megoldást kísérel létrehozni. A cikk bemutatja ennek az összetett feladatnak a sokszínűségét, valamint az elsajátítási lehetőségét, az Óbudai Egyetem veterán-gépjármű restaurátor szakmérnök képzését.

Kulcsszavak: veterán gépjármű, restaurátor, szakmérnök képzés

Abstract — The restoration of vintage vehicles will always remain a hot topic, as vehicles from the past showcase engineering solutions from the past that were often ahead of their time. These vehicles not only reveal the technology of a particular era, but also the aesthetic direction, or the design attempts to create a solution that goes beyond. This article describes the diversity of this complex task and the possibility to learn it, the training of the veteran vehicle restoration engineer at Óbuda University.

Keywords: veteran vehicle, restoration, postgraduate course

1 RESTAURÁTOR KÉPZÉS

A műtárgyaknak is megvan a maguk „életpályája”. A művész miután elkészült a művel leggyakrabban áruba bocsájtotta. A vevők a legkülönbözőbb indítástól vásárolták meg a műtárgyakat. Ha saját magát, vagy a számára fontos személyt akart megörökíttetni, akkor portrét rendelt. Ha szépérezékét kielégítendő, vagy hangulati befolyásoló elemként csendéletet, tájképet, szőnyeget, stb. vásárolt, akkor azt a saját miliójében helyezte el. Nagyon gyakori, hogy a műtárgyat egy gyűjtemény részeként szerezte meg az első tulajdonos, és a műértéken kívül, mint vagyon és értékmegőrző elem funkcióját is betöltötte a műtárgy.

A műtárgyat életében rengeteg behatás érheti. Helytelen tárolási mód, természeti beavatkozás (katasztrófa), háborús rombolás, és mint Michelangelo Pietájával is történt, egy örült szándékosan okozott kárt benne.

A legnagyobb kárt okozó rongálást Olaszországban 1972 pünkösdjén egy 32 éves magyar származású ausztrál állampolgár követte el. A Szent Péter bazilikában

kalapáccsal támadt rá Michelangelo Pietá szobrára. Megcsonkította a Pietá-t, a bal karját és arcát. Azóta védik kristályfallal a márványszobrot.



1. ábra Michelangelo Pietája

A műtárgyakat kezdetektől fogva a művészek, festők, szobrászok javították, ismerve elkészítésének anyagait, technikai fogásait. Ők rendelkeztek a megfelelő művészi tehetséggel, hogy a feladatot eltudják látni. Az idők során, az elődök munkájának megbecsülése, az érték növekedés miatt is, szükségessé vált egy önálló szakterület kialakulása, a restaurátoroké. Kezdetben csak a művészeti alkotásokat restaurálták. Idő kellett annak felismeréséhez, hogy minden ránk maradt tárgyi emlék pótolhatatlan és becses tanúja múltunknak, ezért megőrzésükről a legmagasabb színvonalon gondoskodni kell.

A restaurátor-képzés a múltban általában művészeti akadémiákon kezdődött el, gyakran csak mellékszakként, és művészeti alkotások kezelésére korlátozódott (Bécs 1908, Vilnius 1922, Torun 1946, Prága 1947, Varsó 1947, stb.).

A restaurátor szakma tartalma, és ezzel együtt a képzés is sokat változott az idők folyamán. Az induláskor a restaurátor olyan művész volt, aki festmény vagy szobor javításával is foglalkozott, mintegy pénzkereső mellékfoglalkozásként. Tevékenységét az előadó-művészekéhez hasonlították, aki mások műveinek avatott interpretálásával hoz létre új művészi értéket.

Mára teljes szemléletváltás következett be. A nemzetközi szakmai szervezetek megegyeznek abban, hogy a restaurátor-konzervátor új, interdiszciplináris

szakterület képviselője. Magas színvonalú természet- és társadalomtudományos alapképzettséggel kell rendelkeznie, ugyanakkor képesnek kell lennie arra is, hogy a tárgyakon a beavatkozásokat művészi színvonalon, kiemelkedő minőségben elvégezze. Egyre inkább követelmény az is, hogy az új, sajátos tudományos területen a legjobbak kutatóként is helytálljanak. A restauratori-konzervatori tevékenység ma már a teljes tárgyi örökségre kiterjed.

Általános az egyetértés abban, hogy restaurátornak csak az tekinthető, akinek erről szóló egyetemi diplomája van, és csak az a megfelelő képzés, amely lehetőséget teremt a doktori fokozat megszerzésére a restaurátor-konzervátor szakterületen. Európa egyetemén sorra teremtik meg ennek a feltételeit, a Magyar Képzőművészeti Egyetemen is megkezdődött a doktori képzés.

A Magyar Képzőművészeti Egyetemen a Restaurátorművész mesterképzési szakon 10 féléves egységes, osztatlan képzés folyik. A végzettek mesterfokozatú (MA) diplomát kapnak.

A képzés szakirányai:

- képzőművészet (festő-, faszobrász-, kőszobrász)
- iparművészet (papír-bőr, textil-bőr, szilikát fém-ötvös, fa-bútor)

A képzés célja olyan restaurátorművészek képzése, akik ismerik a restaurálás gyakorlatát és elméletét. A végzettek a szakma művészi és etikai követelményeinek tudatában képesek a szakiránynak megfelelő egyedi restaurálási, műtárgyvédelmi feladatok elvégzésére. Megfelelő ismeretekkel rendelkeznek tanulmányaik doktori képzés keretében történő folytatásához.

A Magyar Nemzeti Múzeum is indít Műtárgyvédelmi asszisztens tanfolyamokat. A tanfolyam egy éves (10 hónap, havi egy hét) középfokú végzettséget adó, iskolarendszeren kívüli tanfolyam, OKJ száma: 52 8425 01.

A jelentkezési feltételek között középiskolai végzettséget, közgyűjteményi igazolást, sikeres felvételi vizsgát írnak elő. A felvételi a középiskolai biológia és kémia tananyaga. Maga a képzés költségtérítéses, évente 12 fő felvételét teszi lehetővé.

Az NSZFI (Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet) az 54 211 12 0001 54 01 OKJ számon nyilvántart egy Restaurátor technikus képzést, követelményei tananyaga megtalálható a www.nive.hu honlapon). A képzés indulásának nyomára nem akadtunk.

Mint a fentiekből látható, a restaurátorképzés, akár a Nemzeti Múzeumban, akár a Magyar Képzőművészeti Egyetemen vagy az NSZFI által kínált képzésben kimondottan a műtárgyak, így a képzőművészeti alkotások megőrzésére, restaurálására helyezi a hangsúlyt. A múlt technikai örökségét képező járművek, ezen belül is a közúti gépjárművek állagmegőrzésével, felújításával, restaurálásával ezen intézmények nem foglalkoznak.

2 AZ ALAPGONDOLAT

A Budapesti Műszaki Főiskola Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kara 2006-ban keresett egy olyan emblemikus tárgyat, amely a gépészmérnök-képzéshez jól köthető. Mivel a BMF Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar épülete előtt volt kiállítva az egyetlen fenn maradt V60 Kandó rendszerű

villanymozdony, így a Bánki Kar is először a névadóhoz köthető Bánki porlasztót képzelte el a kar aulájában kiállítani. A Műszaki Múzeumban megtalálható az eredeti leírás és az első porlasztó is, ezért annak rekonstrukciója lett volna a kiállítandó tárgy. A mozdony és a porlasztó, mint kiállítási tárgy megjelenését elemezve a kar vezetősege úgy döntött, hogy egy másik attraktív tárgyat választ a kar szimbólumának.



2. ábra A V60-as mozdony és a Bánki-Csonka karburátor

Mivel közeledett a XX. század autójának választott Ford T-Model 100 éves jubileuma (az első darab 1908 októberében készült el), az a döntés született, hogy a jogelőd intézményben végzett tervezőnek, Galamb Józsefnek állítunk emléket.

Ezért vásároltunk egy látszólag nem túl romos T-Model gépkocsit.



3. ábra Megérkezik a T-Model, alkotójának iskolájába, és a restaurált gépkocsi

A megvásárolt gépkocsi rendkívüli módon dokumentálva volt, az eladási számlák, tulajdonosok követhetőek voltak. A Bánki Kar oktatói, hallgatói két éves munkával teljes körű restaurálást végeztek a gépkocsin, amelyik végül is a Muzeális Minősítő Bizottság döntése szerint példamutatóan, a maximális 100 pontosra sikerült.

A restaurálás folyamán rengeteg probléma merült fel, a jármű szerkezetéből adódóan fémpipari, faipari, bőr-műbőr, jármű szerkezeti, gépjármű villamossági, felületvédelmi ismeretekre volt szükség. Mindennek utána kellett nézni, az elvégzett munkákat, az irodalomkutatás lépéseit dokumentálták. Megkeresték az országban működő cégeket, amelyek hasonló tevékenységeket végeznek, és összegyűjtötték a legkisebb ismeret morzsákat is.

A régi autók, motorok rajongói között egy jelentős rétegnek nincs lehetősége, ügyessége, műhelye, stb. arra, hogy saját kezűleg újítson fel esetleg romos járművet. Ők olyan cégekhez fordulhatnak, akiknek már megfelelő tudásuk alkatrész bázisuk, és beszerzési forrásuk van. Referenciákkal rendelkeznek, arra alapították a cégeiket, hogy minőségi munkát végezve ezen a piacon realizáljanak nyereséget, ebből a tevékenységből éljenek meg.

Mivel a járműrestaurálás rendkívül szerteágazó tevékenységeket takar, a karosszéria munkáktól kezdve a faipari munkákon át a különböző kárpitosmunkákig bezárólag (nem említve most még nagyon sok

komponensét), a cégek kooperációs partner hálózatot is kiépítenek.

3 NÉHÁNY RESTAURÁLÁSSAL FOGLALKOZÓ VÁLLALKOZÁS BEMUTATÁSA

A 911 Sport és Veteránautó Kft. például a léghűtéses motorú járművek, ezen belül is főleg Porsche gépkocsik felújítására szakosodott. Beszerezték a célszerszámokat, hatalmas dokumentum tárat hoztak létre, olyan szakembereket gyűjtöttek össze, hogy a teljes restaurálást tudnak vállalni az adott márkán belül.

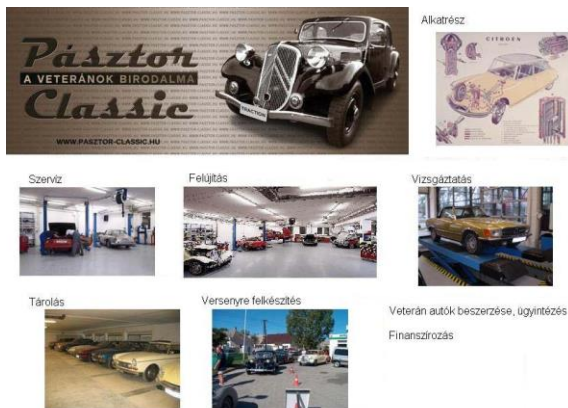


4. ábra 911 Sport és Veteránautó Kft műhelye Csepelen

Hasonlóan működik a Pásztor Classic Kft., amely szélesebb palettán működik, kínálatában a következők szerepelnek:

1. Veterán autók beszerzése, ügyintézése
2. Finanszírozás
3. Alkatrész beszerzés
4. Felújítás
5. Versenyre való felkészítés
6. Tárolás
7. Vizsgáztatás, veteránjárművek minősítése

Mint látható, az ügyfél teljes körű kiszolgálására álltak rá, kimondva, hogy elsősorban Citroen gépkocsikkal kívánnak foglalkozni.



5. ábra A Pásztor Classic Kft tevékenysége

Egészen egyéni és követendő szemlélete van Kovács Miklósnak és csapatának, az Old World Garage 2000 restaurátor műhelynek Zuglóban. A honlapjukon található hitvallásuk szerint egy veterán gépjármű restaurálása a

legapróbb alkatrésze bontás utáni teljes körű felújításig terjed. Munkájukra ugyancsak teljes garanciát vállalnak, díjazásuk nyílt, munkaelemekre lebontott.



6. ábra Az Old World Garage 2000 két szekciója

4 ELVI ELTÉRÉSEK A MŰTÁRGY ÉS A GÉPJÁRMŰVEK RESTAURÁLÁS KÖZÖTT

A veterán-gépjármű restaurálása elméletében is eltér a műtárgy restaurálásának céljától és módszereitől. Alap gondolata a „semmit nem ártani, mindent megőrizni” csak erős kompromisszumokkal lehetséges. A kompromisszum viszont nem mehet a jármű tulajdonságainak, jellegének, korának megsértésével.

A nagy dilemma a megőrzés – konzerválás, a felújítás és a restaurálás kérdései között áll fenn. A konzerválás biztosítja a jármű további romlásának megakadályozását, alkalmassá teszi a használat során bekövetkező változások, károsodások további megszüntetését, ugyanakkor a gyártási és használati állapot bemutatását.

A felújítással külön most nem foglalkozunk, mert ennek fő feladata a veterán jármű forgalom képességének megőrzése. És itt érkezünk el a járművek restaurálásának két fő vonalához.

A működőképesség helyreállítása feltételezi, hogy a veterán jármű a restaurálás során a lehető legtöbb alkatrészét megőrzi, csak a működésképtelen darabok cseréje következik be a munka során. A fellelhető dokumentációk alapján a lehető legjobban meg kell közelíteni a gyártáskori állapotot, az alkalmazott technológiák során az akkori kor adottságainak megfelelő anyagokat kell beépíteni, és lehetőleg követni kell a gyártáskori módszereket.

A működtethető – üzemeltethető restaurálás során a fentiekén kívül gondolni kell arra is, hogy a gépjárművek üzeme veszélyes üzem, és ennek a kritériumnak is meg kell felelni. A közúton közlekedő járműnek a mindenkori közlekedési szabályoknak is meg kell felelni, még akkor is, ha a jogszabályi környezet bizonyos kompromisszumokat megenged.

Minden olyan utólagos beépítést úgy kell elvégezni, hogy az a legkisebb munkával, nyom nélkül bármikor visszaalakítható legyen. Példaképpen megemlítjük, hogy a karos irányjelzővel gyárilag szerelt gépkocsik így a forgalomban nem vehetnek részt, tehát a jogszabályban előírt módon kiegészítő jelzőberendezést kell elhelyezni rajtuk. Mi legyen a kívánatos megoldás? Valamilyen, a kornak megfelelő világítótestet szereljük fel a gépjárműre, és annak átalakításával tegyük a járművet forgalomképessé?

Választhatjuk a műtárgy restaurálásához közelebb álló megoldást is. Az alapelv ilyenkor az, hogy a műtárgy egyes elemeinek pótlása, anyagában, színeiben jelentősen

térjen el az eredeti műtárgy struktúrájától, jelezve, hogy itt egy rekonstrukcióról vagy pótlásról van szó. A választott példa esetében korrektebb eljárásnak tartjuk, ha a közlekedésben résztvevő járműre egy kereskedelmi forgalomban kapható „utánfutó irányjelző garnitúrát” szerelünk fel, így téve eleget a közlekedésbiztonsági előírásoknak, és egyben jelezzük az avatatlan szemlélőnek is, hogy itt egy, a mai kor szabályainak megfelelő kiegészítésről van szó.

A kiegészítő berendezést oly módon kell elhelyezni a járművön, hogy az, az eredeti szerkezetet ne károsítsa, kiállításokon, bemutatókon egyszerűen eltávolítható legyen. Az eredeti karos irányjelző funkcionálisan működőképessé tehető legyen ezen alkalmakra.

5 A GÉPJÁRMŰ RESTAURÁTOR KÉPZÉS TANANYAGA

A Bánki Kar lelkes oktatói a munka során döbrentek rá, hogy a jogszabályi háttér ellenére is rettenetes káosz van a veterán gépjárművek restaurálása terén. A jóindulatú közreműködők, sokszor a megrendelő kívánságainak engedve, visszafordíthatatlan káros beavatkozásokat végeznek a veterán járműveken, amelyeknek a múltunk örökségét kellene hordozniuk. Ezért elhatározták, hogy a felhalmozott ismeretanyagot, megfelelő kiegészítésekkel közkincsé kell tenni.

Közel két éves, a szakmát képviselő résztvevőkkel folytatott egyeztető munka során kialakították a „Veterán-gépjármű restaurátor” szakmérnöki képzés mintatantervét, jogszabályi háttérrel. A munka során a Budapesti Műszaki Főiskola elnyerte az egyetemi rangot, így a 2010-es évben induló veterán-gépjármű restaurátor szakmérnöki képzés már egyetemi posztgraduális képzéssé vált.

Alapgondolatunk az volt, hogy a szakmérnöki képzés 4 féléves, a hallgatók megismerkednek a nemzetközi és a magyar járműtörténettel, átfogó ismereteket kapnak a járműépítésben használatos fémek (vas, acél, színes és könnyűfémek), a nemfémek (fa, bőr, műbőr, műanyagok, gumi, üveg), valamint a restaurálási segédanyagok tulajdonságairól, felhasználásának módjáról. Megismerkednek a korhű, és a restaurálás során használható korszerű technológiákkal, etikai és muzeális ismeretekkel. A restaurálás során alkalmazott gyakorlati fogásokat az Egyetem laboratóriumaiban és elismert restaurátor cégeknél ismerik meg, kipróbálják. A képzés célja, hogy egy veterán-gépjármű teljes restaurálási munkálatait a szakmérnök átlássa, a munkákat kalkulálni, ütemezni tudja, minőségi elvárásait pontosan megfogalmazza, partnereinek tevékenységét gazdaságosan koordinálja.

A képzés indítása folyamatos, minden év szeptemberében kezdődhet az újabb kurzus.

A képzés tananyagát a következő elvek szerint határoztuk meg.

5.1 Kompetenciák

5.1.1 *Eszköz jellegű kompetenciák*

Az alapos szakmai ismereteken túl megismerő készség, helyzetfelismerő készség, számítástechnikai ismeretek és felhasználói készség, probléma- megoldó és döntési készség, kommunikációs készség, analitikus és szintetizáló gondolkodásmód, tárgyalókészség.

5.1.2 *Személyes kompetenciák*

Alkalmasság a különböző szakterületek közötti kommunikációra. A megrendelőkkel való együttműködési készség. Fejlett mérnöki gondolkodásmód, elhivatottság a műszaki emlékek megővésére, megoldás motiváció, csapatmunka irányítására, koordinálására való készség, önálló munkavégzés, szakmai felelősség vállalás.

5.1.3 *Módszertani kompetenciák*

Vezetői rátermettség, rendszerező és értékelő gondolkodás, szervező és szakmai irányító szerep felvállalása, szakismeretek befogadására és átadására motiváltság, döntéshozatali önállóság, nyitottság, a gyakorlat és az elmélet összekapcsolásának készsége, új helyzetekhez való alkalmazkodás képessége, a minőség iránti elkötelezettség, kritikai és önkritikai gondolkodás, ötletgazdaság, rugalmasság.

5.1.4 *Szakmai, speciális kompetenciák*

A megőrzendő értékek minőségének definiálása és nagy biztonsággal való felismerése. A járműtörténet és a korabeli gyártási környezet alapos ismerete, az elmélet és gyakorlat közötti kölcsönös kapcsolat ismerete.

- Motiváltság az ismeretanyag folyamatos bővítésére. Új szakmai eredmények megismerésére való igény, ezek alkalmazhatóságának kritikus felismerése, az autentikus módszerek etikus helyettesítésének felismerésének. A komplex rendszerek megértése, a rész és az egész viszonyának értelmezése.
- Jó megfigyelőképesség.
- Kiemelkedő tárgyalóképesség (idegen nyelven is) szakterületen belüli és kívüli, vagy civil szereplőkkel. Felkészültség a szakmai egyeztetések megszervezésére és lebonyolítására. Munkaterv és program készítésének és végrehajtásának képessége.
- Személyes adottságok, készségek
Amint a tanulmányi területek és azok arányából kitűnik, elengedhetetlenül szükséges szakmai tudáson és készségeken kívül a veterán-gépjármű restaurátorképzésben fontos szerepe van a személyiség fejlesztésnek. Ez elsősorban annak a kettős szerepnek köszönhető, amit a veteránjármű restaurátornak kell betölteni a megrendelő (jármű tulajdonos) érdekeinek, kívánságainak teljesítése közben, és azzal, amikor a szakmai-etikai követelmények összhangba hozásakor kell követnie. A jó helyzetfelismerés, kommunikációs készség, szervező készség nélkülözhetetlen eszközei a szakmai tudás és meggyőzés sokoldalú érvényesítésének.

5.1.5 *A szakképzettség alkalmazása konkrét környezetben*

A konkrét környezet a veteránjármű restaurálása szakosodott vállalkozás, a konkrét tevékenység ennek a vállalkozásnak az irányítása, a restaurálási munkában való szakszerű részvétel. A megszerzett szakképzettség birtokában tevékenykedő veteránjármű restaurátorok elvárhatóan magasabb színvonalon fogják gyakorolni hivatásukat. Befolyással lesznek a szakmára, a kulturális örökség részét képező járműtörténeti emlékek megővésének szakavatott képviselői lesznek.

5.2 *Tantárgyak*

Általános gépjármű ismeretek

Jármű történet, fejlődési irányzatok, alkalmazott technika történeti megoldások kialakulása. Fődarabok fejlődése. Elektromos rendszerek kialakulása.

Gépjármű történet (nemzetközi)
Magyar járműgyártás története
Jármű motorok
Gépjárművek tüzemanyag-ellátó rendszerei
Gépjármű villamosság
Erőátvitel, futóművek
Felépítmények
Integrált gyakorlat I.
Integrált gyakorlat II.

Korhű és korszerű gyártási környezet, alkatrész pótlások módszerei

Gépjárművek gyártásának történeti fázisai, módszerei. Az alkalmazott fém és nemfém anyagok felhasználásának lehetőségei. Mérések, rekonstrukciók. Korszerű és különleges alkatrészgyártási módszerek. Kenőanyagok, segédanyagok.

Anyagtudomány I. (Fémek anyagok)
Anyagtudomány II. (Nem fémek anyagok)
Anyagtudomány III. (kenőanyagok, restaurálási anyagok)
Lemezalakítás
Hegesztés, hőkezelés
Felületvédelem és kikészítés
Korhű technológiák
Korszerű technológiák
Különleges technológiák
Műanyag alkatrészek kis darabszámú gyártása

A szakmérnöki képzés szakdolgozat készítésével és záróvizsga letételével ér véget. A képzésről részletes információk elérhetők a Kar honlapján.

6 A MEGVALÓSULT RESTAURÁTOR SZAKMÉRNÖKI KÉPZÉS

Az Oktatási Hivatal 2009-es engedélye alapján, az Óbudai Egyetemen 2010-ben beindult Veterán-gépjármű restaurátor szakmérnök képzés tanulmányairól és mindennapi életéből közlünk néhány szemelvényt.



7. ábra Ünneplés évnyitó 2010. februárban és tanulmányút az ausztriai Koller gyűjteményben

A képzés során több veterán gyűjteményben is látogatást tett a tanulókör. Így jutottunk el Ausztriába a Koller gyűjteményt megtekinteni, látogatást tettünk Mezőkövesden a Mezőgazdasági Gépmúzeumban is.

A színvonalas restaurálási tevékenységet végző műhelyeket is meglátogattuk, így a csepeli 911 Sport és Veteránautó KFT., Cserny László mezőkeresztesi restaurátort, Gyomaendrődön a Motorkerékpár Múzeumot. A gyakorlatok egy részét az adott munkára szakosodott cégeknél tartották. A több órás összevont

gyakorlatokat kiscsoportos bontásban tartották, így lehetőség volt az egyes munkafogások megismerésére, kipróbálására.



8. ábra Ismerkedés az angol kerékekkel és látogatás a közlekedési múzeum raktárában

A Nydantech Kft-nél megismerkedhettek a fémfelszórásos javítástechnológiájával, kipróbálhatták a felület előkészítésének fogásait, az alacsony és magas hőmérsékletű fémszórás fogásait, kézbe vehették és kipróbálhatták eszközeit.

A XX. század első éveiben a gépkocsik több része fából készült. A fa szerves anyag lévén könnyen romlik, károsodik, így ezen fa szerkezeteknek restaurálása, a végletesen károsodott részek kiváltása nagyfokú felkészülést igényel. Az autópátika Kft-nél megismerkedtek a járműépítésben használt faanyagokkal, szerszámokkal, gépekkel. Látták a szakszerű anyagtaroló kialakítását, ragasztott fa elemek hajlítását gépi csapolását kipróbálhatták.



9. ábra Hegesztési gyakorlat a BGK-n

Az Old Wordl Garage telephelyén két fajta gyakorlatot is tartottunk, az egyik a lemez munkákhoz kapcsolódó felület tisztítás (szemcseszórás különböző anyagokkal) és lemez hajlítás, szabad domborítás gyakorlat volt. A másik pedig motorszerelési gyakorlat, ahol a hallgatók szerelési sorrendet terveztek, speciális szerszámokkal munkafogásokkal ismerkedtek meg.



10. ábra Járműtechnikai mérések a BDKGSZSZ-ben

A Bánki Donát Közlekedésgépészeti Szakközépiskola és Szakiskola igazgatójával – Fehér Dalma igazgatóasszonnyal egy együttműködési megállapodást sikerült kötni, melynek keretében a az iskola korszerű

diagnosztikai laboratóriumában járműtechnikai méréseket hajtottunk végre.



11. ábra Kárpitos munkák Mihály László műhelyében

A képzés tananyagának összeállításában és a bevezetőben említett Ford T-Model restaurálása során Mihály László kárpitos és szaktanár műhelyében a kárpitozás anyagaival, eszközeivel találkoztak a hallgatóink. Külön gyakorlatot tartottunk a szövet és a bőr kárpitozás megismerésére.



12. ábra Tapasztalatcsere a 911 Sport és Veteránautó Kft-nél

A 911 Sport és Veteránautó Kft-nél tett látogatásunk során egy 1936-os Mercedes-Benz gépkocsi restaurálásának befejező fázisát figyelhetjük meg. A tulajdonos Török Gábor bemutatta, hogyan gyártották újra a gépkocsi mahagóni fából készült döntött helyzetű műszerfalát egy kisméretű CNC fúró-marógépen úgy, hogy a beszerelt műszerek tengelye vízszintesen helyezkedjenek el.

A Veterán-gépjármű restaurátorképzésben kellő súlyt kapott a „nagy vasak”, a stabil motorok, a mezőgazdasági gépek állag megőrzése, restaurálásának kérdései, speciális problémái. A Mezőkövesdi Mezőgazdasági Gépmúzeumban az alapító Hajdú Ráfis János és a múzeum igazgatója Kádár Zoltán kalauzolta a képzés hallgatóit, oktatóit a kincseik között. Kádár Zoltán egy részletes előadást tartott egy 100 éves lokomobil történetéről, restaurálásáról, majd az előadás betetőzésekképpen a gépet be is indította.



13. ábra 100 éves lokomobil indítása a Gépmúzeumban



14. ábra VW motoros tűzoltó szivattyú indítása Cserny László Veterán jármű gyűjtőnél



15. ábra Szabadelőadás a veterános pikniken

A hallgatók az első év végén Kecskemét mellett egy lovas tanyán veterános pikniket szerveztek, ahol családtagokkal együtt egy kellemes napot töltöttek el. Mivel a képzés során sok megválaszolatlan probléma merült fel, ezért amíg a bográcson az ebéd készült, önképző körrel jelleget az egyes témákból szabad előadásokat tartottak. A kurzus hallgatói a képzés során is sokszor vállalkoztak egy-egy téma, tananyag kiegészítésére.



16. ábra Működik az Austro-Daimler a Tűzoltó Múzeumban

Csicsmann Gyula igazgató úr meghívta a kurzus hallgatóit és bemutatta a Tűzoltó Múzeum féltett, és példásan megőrzött járműveit. A látogatás fénypontja az 1903-as Austro-Daimler tűzoltó autó beindítása volt.

A Veterán-gépjármű restaurátor szakmérnöki képzés hallgatói önálló kiállítási standdal vettek részt hazai veteránjármű kiállításokon, így az OLDTIMER EXPO-n és az OLDTIMER SHOW-n is. Fontos kiállítási lehetőség az Autó Motor Tuning Show amit minden évben a HUNGEXPO területén tartanak, és a veterán járművek pavilonjában a Magyar Veteránjárművesek Szövetsége jóvoltából kapunk kiállítási területet.



17. ábra Kiállítási stand az az AMTS veterán járművek pavilonjában

7 ÖSSZEFOGLALÁS

A képzés tananyagában, és a záróvizsga követelményei között is hangsúlyos helyet foglal el a Gépjármű történet tárgy. Fontos megismerni azt a korszakot is, amikor egy gépjármű megszületik. Annak a korszaknak technikai társadalmi adottságainak ismerete szükséges az autentikus restauráláshoz. A hallgatók esszé formájában, komoly levéltári kutatások során feldolgozták egy-egy időszak jármű típusait, gyártási körülményeit, kereskedelmét, autó-motor sport történetét. Az elkészült magas színvonalú esszék közül már többet közölt a szakajtó, és még jó pár vár megjelenésre.

A járműtörténeten belül nagy súlyt helyeztünk a magyar járműgyártás múltjának megismerésére is.

A restaurálási anyagok és technológiák oktatása során, gondot fordítottunk a műtárgy restaurálási szabályaira, így oktattuk a korabeli anyagokat, mesterségbeli fogásokat. Ugyanakkor nem feledkezhettünk meg arról sem, hogy bizonyos eljárásokat a mai kor már nem használhat – mint például a cianidos krómozást, ezért mindazon korszerű technológiákat is sorra vettük, amelyek a gépjárművek restaurálását könnyebbé teszik, alkalmazásukkal kielégíthetjük a működő - működtethető restaurálás követelményeit.

A képzés során figyelemmel voltunk a MAVAMSZ (a Magyar Veteránautós és Motoros Szövetség) állásfoglalásaira, a veterán gépjárművek muzeális minősítésének jogszabályi hátterére. Hallgatóinkat az etikus restaurálás szabályainak maximális betartására ösztönöztük.

2012. február 1-én és 2-án volt az első veterán-gépjármű restaurátor szakmérnökök záróvizsgálója. A vizsga elnökségében képviseltette magát a MAVAMSZ elnöke, a Magyar Műszaki és Közlekedési Múzeum főigazgatója, külsős restaurátor cégek képviselői. A hallgatók a felkészültségükről számoltak be, szakdolgozatukat megvédték. A kétnapos vizsga során, a sok elkészült restaurálási munka mellett, a restaurálás etikájáról és a korszerű technológiák etikus felhasználásáról is hallhattunk értekezést.



19. ábra A záróvizsga pillanatai

A befejeződött első restaurátor kurzus tanulságait kielemezve, a tananyagban, annak struktúrájában változtatásokat hajtottunk végre, hogy minél jobban kielégíthessük a képzésre jelentkezők elvárásait. Megállapíthatjuk, hogy Magyarországon ez a képzési forma hiánypótló. A jelentkezőket továbbra is várjuk, és újabb és újabb „Veterán-gépjármű restaurátor” szakmérnök kurzusokat indítunk az igényeknek megfelelően.

Felületi érdességi paraméterek vizsgálata esztergált felületek esetében

Study and comparison of surface roughness parameters in turning

Lóránd Áron*, Drégelyi-Kiss Ágota**

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

*lorand.aron@bgk.uni-obuda.hu, **dregelyi.agota@bgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás - A felületi érdességmérést érintő 2021-es szabványváltozásból kifolyólag kidolgoztuk a felületi érdességet jellemző paramétereket a legújabb, ISO 21920:2021 szabvány szerint, mivel jelenleg az egyetem nem rendelkezik olyan kiértékelő software-rel vagy mérőműszerrel, amely képes lenne erre. A cikk célja részleteiben bemutatni az új adatfeldolgozási eljárást, illetve esztergált etalonokon Mitutoyo SJ 301-es érdességmérő műszerrel végzett mérésekkel validálni az eljárás helyességét. Ezt a mérőműszer által mutatott értékekkel való összehasonlítással végeztük. Eredményként csekély eltéréseket kaptunk, amelyre az új eljárás mellett a numerikus módszerek különbsége is magyarázatot adhat.

Kulcsszavak - felületi érdesség, adatkiértékelés, adatszűrés, ISO 21920 szabvány

Abstract - As a result of the 2021 standard change affecting surface roughness measurement, we developed a software to calculate the parameters characterizing surface roughness according to the latest ISO 21920:2021 standard, as the university currently does not have evaluation software or measuring devices capable of this. This article aims to provide a detailed explanation of the new data processing procedure, and to confirm its accuracy through measurements on turned artifacts using a Mitutoyo SJ 301 roughness measuring instrument. This was done by comparing the calculated values with the ones shown by the device. As a result, we obtained minor differences, which can be explained by the difference in numerical methods as well as the new procedure.

Keywords: surface roughness, data processing, filtration, ISO 21920 standard

1 BEVEZETÉS

A 2021-ben bevezetett új, felületi érdességre vonatkozó szabvány számos, kisebb-nagyobb változást hozott a felületi érdességre vonatkozó jellemzők, paraméterek kiszámításában. Mivel mind kutatásban, mind az iparban szükséges a legfrissebb szabvány szerint és a lehető legnagyobb precizitással végezni az adatok kiértékelését, ezért fontosnak éreztünk kidolgozni egy software-t, ami az új, ISO 21920:2021 [1] (módosítva 2022-ben) szabvány alapján számítja ki a felületi érdességre jellemző paramétereket.

Célunk a mérőeszközből kinyerhető nyers adatok feldolgozása volt. Ez magába foglalja az adatok megfelelő szűrését, illetve a releváns paraméterek (Ra , Rz) kiszámítását. Végül össze is hasonlítottuk a mérőműszer által kiszámolt értékeket a saját eredményeinkkel.

Felületi érdességen a felület egyéni, komplex szerkezetét, geometriáját értjük. Fontosságát az is mutatja, hogy rendkívül széles körű azon tulajdonságok, tényezők halmaza, amiket befolyásol az érdesség. Műszaki szempontból érdemes megemlíteni, hogy az érdesség mértéke jelentős hatással van a valódi érintkezési felület nagyságára, a súrlódásra, a kopás fokára. További ilyen tényezők között felsorolhatók optikai, illetve hőteljesítménnyel kapcsolatos tulajdonságok, és például a festhetőség is [2]. Azonban a legfontosabb az, hogy az érdesség paraméterek mérés által meghatározhatóak, így minőségellenőrzésre alkalmasak például valamilyen gyártási folyamat során. Érdekességként megemlíthető az is, hogy biológiai vonatkozása is van: befolyásolhatja a szuperhidrofób viselkedést is [3].

Ahogy minden mérnöki folyamat, úgy a felületi érdességmérés is szabályozott. 2021-ig bezárólag az ISO 4287:1997 [4] és ISO 4288:1996 [5] szabványok voltak érvényben. 2021 végén azonban új szabvány lépett a helyükbe, az ISO 21920:2021, amely - a 2022-es csekély módosításokkal - azóta is hatályos. Első része a felületi érdesség jelöléseit határozza meg, második része a szakkifejezések és a paraméterek definícióit adja meg, végül a harmadik a felületi textúra pontos előírásával foglalkozik. A különbségek a szabványok között négy kategóriába sorolhatók: elnevezésekben, jelölésekben bekövetkezett változások, új paraméterek (pl. az abszolút gradiens átlaga) és új profil elemek megjelenése (pl. a profilcsúcs mellett a profilvölgy).

1. táblázat: A korábbi és jelenlegi felületi érdességi szabvány főbb nevezék változásai

ISO 4287	ISO 21920
kiértékelési hossz (<i>evaluation length</i>) l_n	kiértékelési hossz (<i>evaluation length</i>) l_e
mintavételezési hossz (<i>sampling length</i>) l_r	szekcióhossz (<i>section length</i>) l_{sc}
a legtöbb paraméter a mintavételezési hosszban van definálva	csak R_{pt} , R_p , R_{vt} , R_v , R_z vannak a szekcióhosszon kiértékelve, minden más a kiértékelési hosszban kerül definálásra
profilcsúcs (<i>profile peak</i>)	profilhegy (<i>profile hill</i>)
-	profilcsúcs (<i>profile peak</i>)
profilvölgy (<i>profile valley</i>)	profilvölgy (<i>profile dale</i>)
-	profilgödör (<i>profile pit</i>)
-	korrelációs hossz (<i>correlation length</i>)

Kiértékelés szempontjából a legjelentősebb különbség az, hogy míg korábban a mintavételezési (most: szekció-, lásd hamarosan) hossz (angolul: sampling length volt, most már section length, l_{sc}) kellett a paramétereket kiértékelni, majd ezeket átlagolni, addig most a legtöbb paraméter az egész kiértékelési hossz (angolul: evaluation length, $l_e = n_{sc} \times l_{sc}$, ahol n_{sc} a szekciók száma) értelmezendő. Az 1. táblázatban összefoglaljuk a főbb különbségeket, illetve példát mutatunk az új paraméterekre.

Az összes terület szakirodalmát, ahol előfordul felületi érdesség, összevetve elmondható, hogy a leggyakrabban előforduló paraméterek az átlagos érdesség, R_a , és R_z , az R-profil (érdességi profil) maximum magassága.

Kiszámítási módjaikat az alábbi összefüggések mutatják:

$$R_a = \frac{1}{l_e} \int_0^{l_e} |z(x)|$$

és

$$R_z = \frac{1}{n_{sc}} \sum_{i=1}^{n_{sc}} \left(\max_{j \in N_i} (Z_{vd,j}) + \max_{k \in N_i} (Z_{ph,k}) \right),$$

ahol $z(x)$ az érdességi profil függőleges koordinátája, $Z_{vd,j}$ a j -edik völgy mélysége, $Z_{ph,j}$ a j -edik csúcs magassága, $N_i = \{j = 1, 2, \dots, n_p \text{ vagy } n_p | (i-1)l_{sc} \leq x_j \leq il_{sc}\}$, n_v, n_p a csúcsok és völgyek száma, x_j a j -edik profilcsúcs helyzete az x-tengelyen [1].

Emellett még az R_q , R_v és R_p paramétereket is vizsgáltuk, melyek rendre: négyzetes középmagasság, átlagos völgymélység és átlagos csúcsmagasság (*root mean square height*, *mean pit depth* és *mean peak height*). Ezek közül az utóbbi kettő összege adja meg R_z -t, és ahogy a nevük is mutatja, a szekciókra átlagolt mennyiségekről van szó.

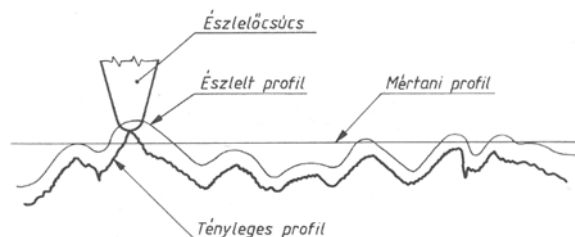
2 ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1 A szűrés folyamata

Ahhoz, hogy az érdesség paramétereket ki tudjuk számolni, elő kell állítani a letapogatott felszínről készített modelltől a felületi érdességi profilt, vagyis az R-profilt. E célból az adatokban egy szűrés folyamat lépésein szükséges végigvinni. Azonban az érdességmérésnél nemcsak numerikusan történik szűrés, hanem mechanikusan, a tapintó által is. Az alábbiakban bemutatjuk, milyen szűrés lépések vannak, és melyik milyen felületi modellt eredményez.

Minden testnek egyedi felszíne van, sajátos geometriával rendelkezik. Az ezt bemutató modellt hívjuk felületi modellnek (*skin model*). A felületi érdesség mérése során a felületen található völgyeket és csúcsokat szeretnénk letapogatni. Amennyiben nem optikai, hanem tapintótűs eszközzel határozzuk meg a felületet, a mérőműszer feje nem fér bele minden felület minden mélyedésébe, így a felületet nem minden esetben tudjuk tökéletesen letapogatni a tapintófejjel, amikor az a mérendő felületen végighalad. Ez egyfajta természetes szűrés, amely tehát a

mérőfej véges méretéből származik [6]. Így kapjuk a mechanikai felületi profilt, amelyet az 1. ábra szemléltet. Értelemszerűen minél kisebb a letapogatást végző gyémántgömb átmérője, ez a két modell annál inkább közelít egymáshoz.

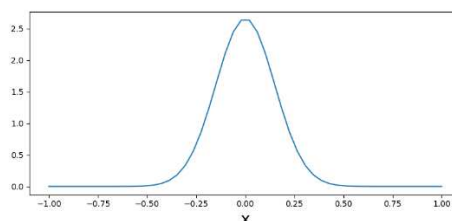


1. ábra: A felületi (tényleges) és mechanikai felületi (észlelt) profil szemléltetése, amely utóbbi a tapintófej véges méretéből fakad

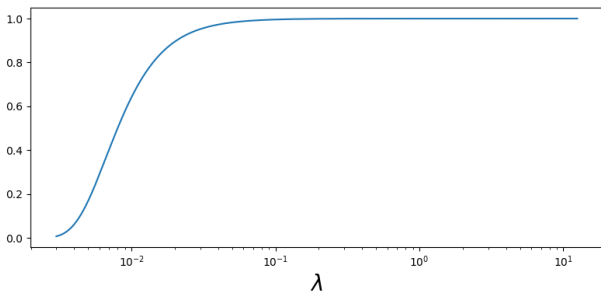
A felületi modellt nem tudjuk tehát meghatározni, a felület letapogatását követően létrejött modellt mechanikai felületi profilnak nevezzük. A mechanikai felületi profil további szűréséhez, melyre azért van szükség, hogy kiszűrjük az érdességhez túl kis és túl nagy hullámhosszú komponenseket, illetve a felület dőltségét/alakját, elengedhetetlen számítógépes adatfeldolgozó módszer.

A numerikus szűrés jelen esetben mindegyik lépésben Gauss-szűrő alkalmazását jelenti, valamilyen *nesting indexszel* vagy levágási hullámhossz értékkel (*cutoff wavelength*, λ_c), amely elnevezések közül a jelen szabvány mindkettőt megengedi, azonban a korábbi szabványban kizárólag utóbbi élt. Ez az érték a Gauss-eloszlás, amellyel a szűréshez a hullámhossz-tartományba transzformált adatsort kell megszorozni, szórására (szélességére) utal, és amelyet mind az előző, mind az ISO 21920 [1] szabvány különböző kiértékelési hosszoknál különböző értékekben határoz meg. Hangsúlyozzuk, hogy a szűrő típusa (ami jelen esetben a Gauss-típusú szűrő) kiértékelési hosszoként (és szabványonként) eltér.

Az adatszűrés első lépése a profil S-filter alkalmazása, N_{is} nesting indexszel (egyéb érvényben lévő jelöléssel λ_s), amellyel az elsődleges felületi profilhoz (*primary surface profile*) jutunk. Ez a gyakorlatban egy aluláteresztő Gauss-szűrő Fourier-térben való alkalmazását jelenti [7], $\lambda_s = 8 \mu\text{m}$ levágási hullámhosszal, vagyis minden olyan hullámhosszt, ami ennél kisebb hullámhosszú (nagyobb frekvenciájú), azt a szűrő elnyomja (tehát az annál nagyobb hullámhosszúak kerülnek be). A Gauss-szűrő Fourier-térben sem egy éles, függőleges határvonalat jelent - ahogy ezt a 2. ábra mutatja -, hanem a nesting index bizonyos környezetében 0-ról 1-re fokozatosan emelkedő függvényről beszélünk. Az S-szűrő tulajdonképpen a nagyon kicsiny hullámhosszú komponensek kiszűrését végzi.



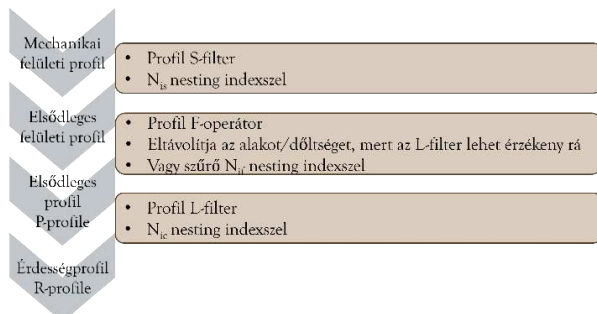
2. ábra: Egy Gauss-eloszlás szemléltetése direkt térben



3. ábra: Ugyanazon eloszlás Fourier-térbeli logaritmus x-tengellyel

Ezután következnek profil F-operátor (*profile F-operation*), aminek alkalmazásával az elsődleges profil (*primary profile*), másnéven a P-profilt kapjuk. Ez legtöbb esetben a felvett profil alakját és/vagy dőlttségét hivatott eltávolítani, mivel a következő szűrő, az L-filter érzékeny lehet arra, ha a profil nem sík. Előfordulhat olyan eset is, amikor ez az művelet ugyanúgy szűrőt jelent, mint az S-filter, mely típusa több fajta lehet, ekkor az ehhez tartozó nesting indexet N_{if} -fel jelöljük.

A szűrési folyamat záró lépése az említett L-filter alkalmazása. Az ezt jellemző nesting index jele N_{ic} , értéke 2,5 mm. Ez egy felülatérsztő szűrő, vagyis minden olyan hullámhosszt fokozatosan átenged, amely ennél az értéknél kisebb. Ez az a szűrő, amely szétválasztja az érdességprofil (roughness profile), tehát az R-profilt, amely a rövid hullámhosszokhoz tartozó finom léptékű szabálytalanságokat mutatja meg, és a hullámosságprofil (waviness profile), vagyis a W-profilt, amely a nagyobb hullámhosszokon előforduló nagyobb léptékű eltéréseket szemlélteti (lásd 10. ábra). Számszerűsítve: minden 8 μm és 2,5 mm közötti hullámhossz az érdesség részét képezi, az ennél nagyobb értékek tehát a hullámossághoz tartoznak. Úgy is megkapható a W-profil, ha a P-profilból levonjuk ábraaz R-profilt, és ugyanez igaz visszafelé is, tehát a W-profilt levonva az R-profilt kapjuk meg. Látható, hogy az R- és W-profilok szoros összefüggésben vannak egymással. Azt, hogy milyen szűrés, legyen az mechanikai vagy numerikus módszerrel létrehozott, milyen profilt hoz létre, a 4. ábra szemlélteti.

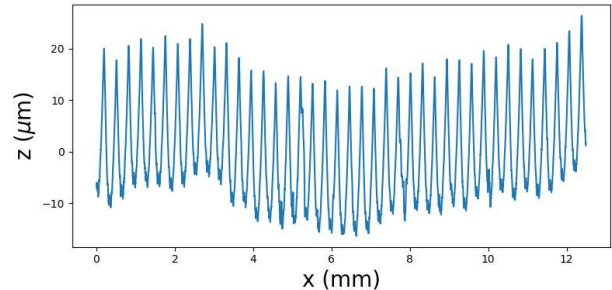


4. ábra: Az adatszűrés folyamatábrája

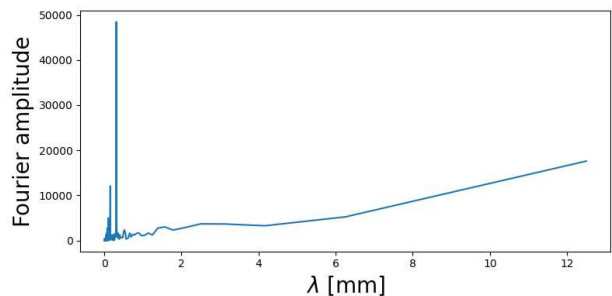
2.2 Numerikus kivitelezés

A szűrés folyamatának numerikus implementálására két út kínálkozik. Az egyik a már említett Fourier-transzformációt alkalmazó, ahol mind a mért profilt, mind

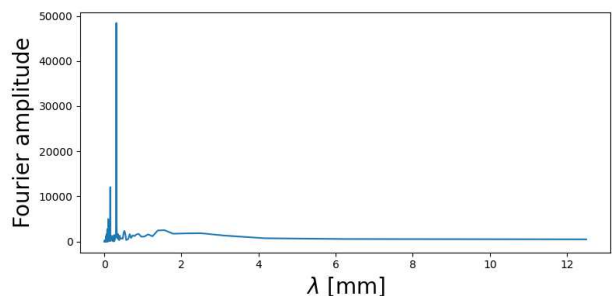
a szűrőt hullámhossz-térben kell venni, majd a profilt súlyfüggvényként meg kell szorozni az adott nesting indexű szűrővel. A 3. ábra tehát gyakorlatilag a szűrő átengedési karakterisztikáját mutatja. Az 5. ábra általunk ábrázolt, szűretlen profilt, az 6. annak Fourier-transzformáltját, a 7. a szűrt Fourier-spektrumát szemlélteti.



5. ábra: Egy szűretlen, mért felületi profil direkt térben



6. ábra: Ugyanazon profil Fourier-spektruma



7. ábra: A szűrt Fourier-spektrum

A másik módszer a direkt térben való szűrés. Ehhez egy kevésbé ismert művelet, a konvolúció szükséges, amit az alábbi módon definiálhatunk:

$$(f * g)(t) := \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)g(t - \tau)d\tau.$$

A direkt térben vett profil és a direkt térben vett, azonos levágási hullámhosszal rendelkező Gauss-szűrő konvolúcióját kell venni, amikor S-filterről és L-filterről beszélünk. A dőltség (tilt) levonása nem változik. Annyiban egyszerűbb a dolgunk, ha ezt az utat választjuk, hogy nem kell a Fourier-transzformációkkal törődni. Bebizonyítható, hogy a két folyamat, a direkt térben vett konvolúció és a Fourier-térben vett szorzás ekvivalens.

Python programozási nyelvet használtunk a kiértékelésre és az ábrák elkészítésére, ahol a számunkra szükséges

diszkrét Fourier-transzformációra beépített parancs van, amely elvégzi mind a Fourier-spektrum, mind az x-tengely értékeinek elkészítését (előbbire a *scipy* könyvtár *fft* parancsa szolgál, utóbbira a *numpy* csomag *fftfreq* parancsa), bár kiemeljük, hogy utóbbi „kézzel” is el lehet végezni, és mi ezzel a lehetőséggel éltünk. A direkt térben elvégzett szűréshez szükséges konvolúció műveletéhez is található beépített parancs: ez a *numpy* csomag *convolve* parancsa. Az adatok beolvasásához, az adatszűréshez, az R- és W-profilok előállításához és a paraméterek kiszámolásához szükséges kódrészletek is olvashatóak alább (az elválasztott részek a folyamat különböző lépéseit hajtják végre):

```
df=pd.read_excel('N09-R.xls',sheet_name=1, header=None)
z=df[3].tolist()
x=df[2].tolist()
rprofile=df[5].tolist()

Fjel=fft(z)
n=8330
l=12.5
dx=1/n
j=arange(1,floor(n/2).astype(int)+1)
lamb=1/j
plot(lamb,abs(Fjel)[1:floor(n/2).astype(int)+1])

n=len(r)
lsc=2.5
nsc=5
le=nsc*lsc
start_index=0
lengths=[]
rmatrix=[]
xmatrix=[[],[],[],[],[],[ ]]
lengths=[]
mins=[]
maxs=[]
for i in range(0,nsc):
    for j in range(len(x)):
        if i*lsc<x[j]<(i+1)*lsc:
            xmatrix[i].append(x[j])
        lengths.append(len(xmatrix[i]))
for length in lengths:
    rmatrix.append(r[start_index:start_index+length])
    start_index+=length
for i in range(0,nsc):
    mins.append(min(rmatrix[i].real))
    maxs.append(max(rmatrix[i].real))
Ra=sum(abs(r))/n
Rq=sqrt(sum(r**2)/n).real
Rp=sum(maxs)/len(maxs)
Rv=abs(sum(mins)/len(mins))
Rz=Rp+Rv
return Ra, Rq, Rp, Rv, Rz

alpha=sqrt(log(2)/pi)
def s_low(lambda_): #low-pass filter
    return e**(-pi*(alpha*lambda_cl/lambda_)**2)
def s_high(lambda_): #high-pass filter
    return 1-e**(-pi*(alpha*lambda_ch/lambda_)**2)
#S filter lambda_c=0,008 mm, F filter: tilt levonása,
#L filter: lambda_c=2.5 mm

Fszürt=Fjel*szűrő_low
temp=ifft(Fszürt).real #visszatranszformáljuk az
#S-filterezett spektrumot, hogy a formot levonhassuk
popt,pcov=curve_fit(fun1,x,temp)
tilt=temp_fun1(arr,popt[0],popt[1]) #tilt levonása
Fszürt=fft(tilt) #vissza FT
Fszürt=Fszürt*szűrő_high

r=ifft(Fszürt).real
w=z-r
```

2.3 A felületi érdesség mérése

Ugyan jórészt az új szabvány szerinti kiértékelés bemutatásáról szól ezen írás, nem mehetünk el mellett, hogy az algoritmusunkat valódi adatokon teszteljük, és a felületi érdességmérő készülék által kiértékelt mérőszámokkal összevessük az általunk kapott értékeket. Ehhez a szükséges adatokat esztergált etalonok méréséből nyertük, amely mérést egy Mitutoyo SJ 301-es profilometrikus mérőeszközzel végeztünk. A műszert a 8., az etalonokat a 9. ábra mutatja. Minden adatfelvételt háromszor ismételtünk meg.



8. ábra: Az adatok felvételéhez használt mérőeszköz

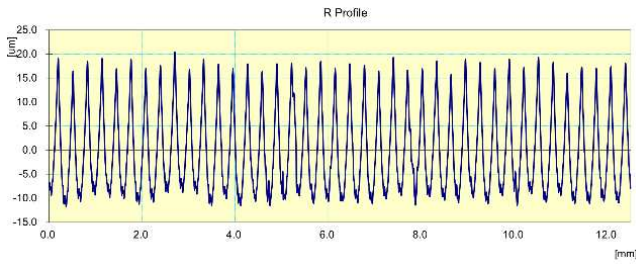


9. ábra A méréshez használt etalonok

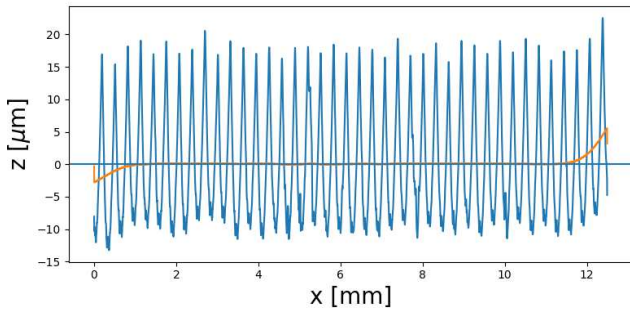
3 EREDMÉNYEK

Több módon tudjuk a kapott eredményeinket összehasonlítani. Ebben a fejezetben az általunk kapott R-profilot vetjük össze a mérőeszköz által mutatott R-profilal. Mint már említettük, ezt a profilt úgy kapjuk, hogy a mért profiltól eltávolítjuk a W-profil megfelelő szűrők segítségével.

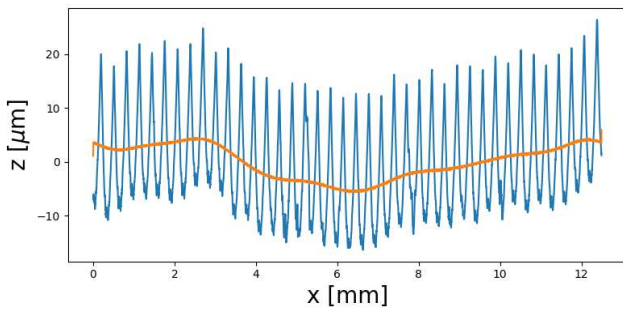
A 10-12. ábra az említett érdességprofilok összevetését mutatja be. A 10. ábra a műszer által meghatározott, míg a 11. ábra az általunk kapott profilt, illetve a kettőnek a különbségét szemlélteti. Az x-tengelyen a vizsgált test szélétől vett távolság szerepel milliméterben, az y-tengelyen az érdesség mértéke (egy adott vonaltól mint 0-szinttől mért függőleges távolság) látható mikronban mérve. A profil szélein minimális eltérés látható, amely részek általában nem relevánsak, mivel ott a mérési bizonytalanság nagyobb a mérési eljárásból következően (a mérőfej a mérendő darabra érskor és az arról való leéreskor nem teljesen egyenes a mérőkar haladása). A 12. ábra a szűretlen profilon mutatja be a W-profilot.



10. ábra: A mérőeszköz által előállított R-profil



11. ábra: A kék grafikon a nyers adatokból általunk kapott R-profil mutatja be, a narancssárga vonal a 8. ábrán látható és az említett R- profil közti különbséget mutatja



12. ábra: Az általunk kapott W-profil (narancssárga) bemutatása a mért profilon (kék)

Az eredmények összevetésének másik formája az érdesség paraméterek összehasonlítása. Ezt az alábbi, 2. táblázatban tesszük meg.

2. táblázat: A mérőműszer és az általunk kapott érdesség paraméterek összehasonlítása

	A mérőeszközből származó paraméterek ISO 4287	Eredmények ISO 21920	%-os eltérés
R_a (μm)	7,54	7,57	0,40%
R_q (μm)	8,70	8,76	0,69%
R_p (μm)	19,41	20,09	3,50%
R_v (μm)	11,51	11,73	1,91%
R_z (μm)	30,92	31,83	2,94%

Jól látható, hogy az R_a , R_q paraméterekben (amelyek igen hasonló jellegű mérőszámok) 10^{-2} -os nagyságrendű eltérés van, az R_z -ben 10^{-1} -es, mivel azt az R_p és R_v különbségének abszolút értékeként képezzük, így mindkét szám a mérőeszközökből származó számoktól való eltérését hordozza. Összességében ezek nem jelentős különbségek. Az eltérések százalékos értékeit a táblázat utolsó oszlopa mutatja (itt az általunk kapott értékeket vettük 100%-nak). Az R_p -ben megjelenő nagyobb, néhány százalékos eltérést magyarázhatjuk a 9. ábrán láthatóakkal. Az x-tengely 12 μm körüli értékénél az általunk kapott R-profil (narancssárga vonal) némileg magasabb értékeket mutat – tehát magasabb csúcsok jelennek meg –, mint a mérőműszer által számoltak. Ugyanez elmondható, ha az R_v -ben jelentkező különbséget akarjuk megérteni. A 0 μm körül nálunk alacsonyabb értékek – mélyebb völgyek – szerepelnek. Ezek a differenciák mutatkoznak meg az átlagos értékek különbözetében. Ezenkívül a különbségek származhatnak a korábban használt és az új szabvány különbözőségéből, illetve a numerikus, számolási eltérésekből (integrálás diszkrét tétel, kerekítés).

4 ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatómunkánk a magasság leíró paraméterek jellemzésére, elnevezésük, kiszámítási módszerükben - a szabványváltozás által - bekövetkezett változások bemutatására szolgál. Ki kell emelni, hogy a felületi érdesség jellemzésére jóval több paraméter létezik (térbeli, hibrid, anyagarányal kapcsolatos paraméterek), amelyekkel jelen kutatásunkban nem foglalkoztunk, ráadásul az ISO 21920-as szabvánnyal újak is születtek (pl. az abszolút gradiens számtani közepe vagy a profilvölgyek ösztérülete), amelyek kiszámítási folyamatainak kidolgozása további feladatnak is tekinthető. Ennek fényében következő lépésben kiterjeszhető a számítási eljárás az általunk nem vizsgáltakra, azonban azt kiemeljük, hogy jelen írásban kidolgoztuk a mérés-technika-kutatás és az ipar számára jelentősebb paramétereket.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] ISO 21920 (2022) GPS. Surface texture: Profile, ISO, Geneva.
- [2] Bhushan, B. (2000). Surface roughness analysis and measurement techniques. In B. Bhushan, *Modern tribology handbook, two volume set* (old.: 79-150). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- [3] Yang, C., Tartaglino, U., & Persson, B. N. J. (2006). Influence of surface roughness on superhydrophobicity. *Physical review letters*, 97(11), 116103.
- [4] ISO 4287 (1997) GPS — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters, ISO, Geneva.
- [5] ISO 4288 (1996) GPS — Surface Texture: Profile Method — Rules and Procedures for the Assessment of Surface Texture, ISO, Geneva.
- [6] Lou, S. e. (2019). An investigation of the mechanical filtering effect of tactile CMM in the measurement of additively manufactured parts. *Measurement*, 144, 173-182.
- [7] Muralikrishnan, B. R. (2009). *Computational Surface and Roundness Metrology* London : Springer-Verlag London Limited.