

ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA

Anyagtudományi Közlemények

5. évfolyam, 2022. 2. szám



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET
Kolozsvár
2022

A folyóirat megjelenését támogatta a Magyar Tudományos Akadémia, a Bethlen Gábor Alapkezelő Zrt., a Communitas Alapítvány és az EME Műszaki Tudományok Szakosztálya / The publication of this magazine was supported by the Hungarian Academy of Sciences, by the Bethlen Gábor Fund, by the Communitas Foundation and by the TMS – Department of Engineering Sciences.



Főszerkesztő / Editor-in-Chief: Bitay Enikő

Nemzetközi Tanácsadó testület / International Editorial Advisory Board:

Prof. Biró László Péter, MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest, Magyarország
 Prof. emer. B. Nagy János, University of Namur, Namur, Belgium
 Prof. Czigány Tibor, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Magyarország
 Prof. Diószegi Attila, Jönköping University, Jönköping, Svédország
 Dobránszky János, ELKH–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapest, Magyarország
 Prof. Dusza János, Institute of Materials Research of Slovak Academy of Sciences, Kassa, Szlovákia
 Prof. Kaptay György, Miskolci Egyetem, Miskolc, Magyarország
 Dr. Kolozsváry Zoltán, Plasmaterm Rt., Marosvásárhely, Románia
 Prof. Mertinger Valéria, Miskolci Egyetem, Miskolc, Magyarország
 Prof. Porkoláb Miklós, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA
 Prof. Réger Mihály, Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország
 Prof. emer. Réti Tamás, Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország
 Prof. emer. Roósz András, Miskolci Egyetem, Miskolc, Magyarország
 Dr. Spenik Sándor, Ungvári Nemzeti Egyetem, Ungvár, Ukrajna
 Prof. Zsoldos Ibolya, Széchenyi István Egyetem, Győr, Magyarország

Lapszám szerkesztők / Editorial Board:

Dobránszky János, ELKH–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapest, Magyarország
 Csavdári Alexandra, Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár, Románia
 Gergely Attila, Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhely, Románia
 Kovács Tünde, Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország

Kiadó / Publisher: Erdélyi Múzeum-Egyesület

Felelős kiadó / Responsible publisher: Biró Annamária

Olvasószerkesztő / Proofreader: Szenkovics Enikő (magyar), David Speight (English)

Szerkesztőségi titkár / Editorial secretary: Kisfaludi-Bak Zsombor

Borítótér / Cover: Kőnczey Elemér

Nyomdai munkálatok / Printed at: F&F International Kft., Gyergyószentmiklós

Copyright © a szerzők / the authors, EME/ TMS 2022

ISSN 2601-1883, ISSN-L 2601-1883

DOI: 10.33923/amt-2022-02

A folyóirat honlapja: <https://www.eme.ro/publication-hu/acta-mat/mat-main.htm>

The journal website: <https://www.eme.ro/publication/acta-mat/mat-main.htm>

Az *Acta Materialia Transylvanica. Anyagtudományi Közlemények* az Erdélyi Múzeum-Egyesület (EME) Műszaki Tudományok Szakosztályának folyóirata, amely az anyagtudományok területéről közlő tudományos közleményeket: szakcikkeket, összefoglalókat (szemléket), tanulmányokat. A folyóirat célja összképet adni kiemelten a Kárpát-medencei kutatási irányokról, tudományos eredményeiről, s ezt széles körben terjeszteni is. A folyóirat az EME felvállalt céljaihoz híven a magyar szaknyelv ápolását is támogatja, így a nyomtatott folyóirat magyar nyelven jelenik meg, mely az Erdélyi digitális adattárban elérhető (<https://eda.eme.ro/handle/10598/30356>). A széles körű nemzetközi terjesztés érdekében a folyóirat teljes angol nyelvű változatát is közzétesszük.

Acta Materialia Transylvanica – Material Sciences Publications – is a journal of the Technical Sciences Department of the Transylvanian Museum Society, publishing scientific papers, issues, reviews and studies in the field of material sciences. Its mission is to provide and disseminate a comprehensive picture focusing on research trends and scientific results in the Carpathian basin. In accordance with the general mission of the Transylvanian Museum Society it aims to support specialized literature in Hungarian. The printed version of the journal is published in Hungarian and is available in the Transylvanian Digital Database (<https://eda.eme.ro/handle/10598/30356>). However, we would like to spread it internationally, therefore the full content of the journal will also be available in English.

Tartalom / Content

BAGYINSZKI Gyula.....	53
<i>Fémalapú habok jellemzői és vizsgálati szempontjai</i>	
<i>Characteristics and Test Aspects of Metal-Based Foams</i>	
BORHY Levente, LEVELES Borbála, KEMÉNY Alexandra.....	58
<i>A ragasztóanyag kiválasztása mikroszakító kötőszilárdsági vizsgálatokhoz</i>	
<i>Choosing the Adhesive for Microtensile Bond Strength Tests</i>	
FÁBIÁN Hunor, GERGELY Attila.....	62
<i>Nagy teljesítményű szálképző berendezés tervezése</i>	
<i>Design of a High Performance Fiber-producing Machine</i>	
FEKETE Gusztáv, TEJ Singh, JÁNOSI Endre.....	66
<i>Térdimplantátumok kopásának modellezése</i>	
<i>Wear Modelling of Total Knee Replacements</i>	
MESZLÉNYI György, BITAY Enikő	72
<i>Szállézeres sugármenetének elemzése a nyálábvezető optikai szál végétől a fókuszfoltig</i>	
<i>Analysis of Fibre Laser's Optical Construction from the End of the Beam Guiding Optical Fibre to the Focal Spot</i>	
MIHÁLY Norbert-Botond, CSAVDÁRI Alexandra	78
<i>Mesterséges neurális hálózatok alkalmazása adszorpciós vizsgálatokban. Esettanulmány</i>	
<i>Application of Artificial Neural Networks in Adsorption Studies. A case study</i>	
NAGY Gábor Zoltán, LÁZÁR Nikoletta, NAGY Roland	83
<i>Kézzetnövényolaj-alapú kenőanyag-adalékok alapanyagainak vizsgálata</i>	
<i>Investigation of Raw Materials for Sulfurized Vegetable Oil Based Lubricant Additives</i>	
SCHRAMKÓ Márton, KAFI Abdallah, KOVÁCS Tünde Anna	89
<i>A hegesztés során képződő UV-sugárzás egészségkárosító hatásának elemzése</i>	
<i>Analysis of the Harmful Effects of UV Radiation Generated During Welding</i>	

TRAUTMAN Bence, TÓTH László, FÁBIÁN Enikő Réka	93
<i>Csőperemezéshez használt szerszámacélok összehasonlítása</i>	
<i>Comparison of Tool Steels for Tube End Flanging</i>	
WINDISCH Márk, MALOVECZKY Anna, ARADI László, VERES Miklós, FÜRJES Péter, VIDA Ádám	99
<i>Lézerrel létrehozott periodikus felületi struktúrák (LIPSS) alkalmazásorientált felhasználása</i>	
<i>Application-oriented Use of Laser-induced Periodic Surface Structures</i>	

Fémalapú habok jellemzői és vizsgálati szempontjai

Characteristics and Test Aspects of Metal-Based Foams

Bagyinszki Gyula

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország
 bagyinszki.gyula@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

There is a continuous development in automotive body production to expand the use of metal foams. The use of aluminium foams in vehicles is made possible by the high strength/mass ratio, which means that mass reduction is not accompanied by a reduction in safety. Reducing mass (self-weight), on the other hand, is essential due to increasingly stringent environmental regulations. The present composition draws attention to the structural properties of metal-based foams and its testability.

Keywords: metal foam, cavity, sandwich structure, non-destructive testing, computed tomography.

Összefoglalás

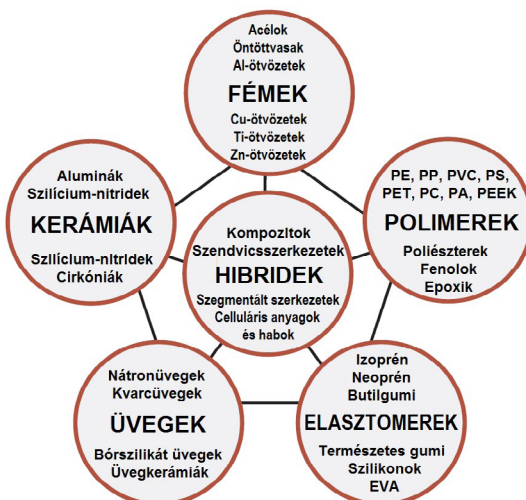
A gépjárműkarosszéria-gyártásban folyamatos fejlesztés zajlik a fémhabok felhasználásának bővítése végett. Alumíniumhabok alkalmazását járművekben a nagy szilárdság/tömeg arány teszi lehetővé, melynek révén a tömeg csökkentése nem jár együtt a biztonság csökkenésével. A tömeg (önsúly) csökkentése viszont elengedhetetlen az egyre szigorúbb környezetvédelmi előírások miatt. Jelen összeállítás a fémalapú habok szerkezeti jellemzőire és annak vizsgálhatóságára hívja fel a figyelmet.

Kulcsszavak: fémhab, üreg, szendvicsszerkezet, roncsolásmentes vizsgálat, CT-vizsgálat.

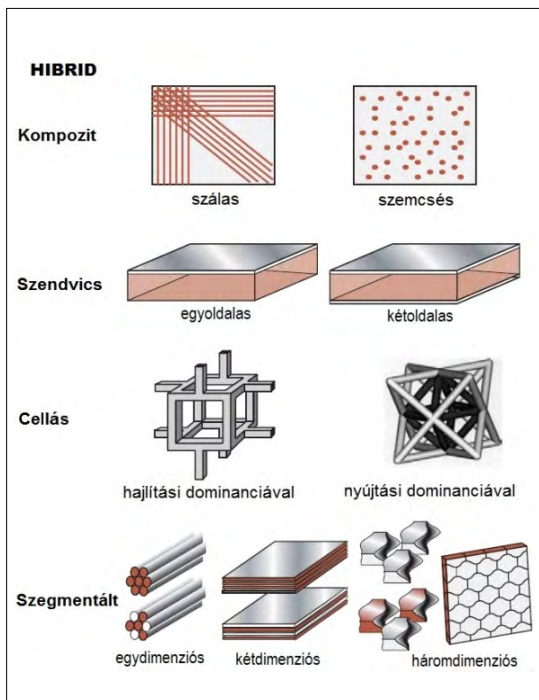
1. Bevezetés

A szerkezeti anyagok egy lehetséges felosztási sémájában (1. ábra) szereplő hibrid anyagok csoportja magában foglalja a kompozitokat (összetett anyagokat), a szendvicsszerkezeteket – mint a réteges kompozitok sajátos alcsoportját –, a szegmentált (összekapcsolt, kötegelt) szerkezeteket és a különféle kialakítású cellás anyagokat, habokat (2. ábra) [1]. A szegmentált (összekapcsolt, kötegelt) anyagok olyan diszkrét egységekből épülnek fel, amelyek tömbi egységként jelentős terheléseket tudnak felvenni, miközben kellően sérüléstűrőek.

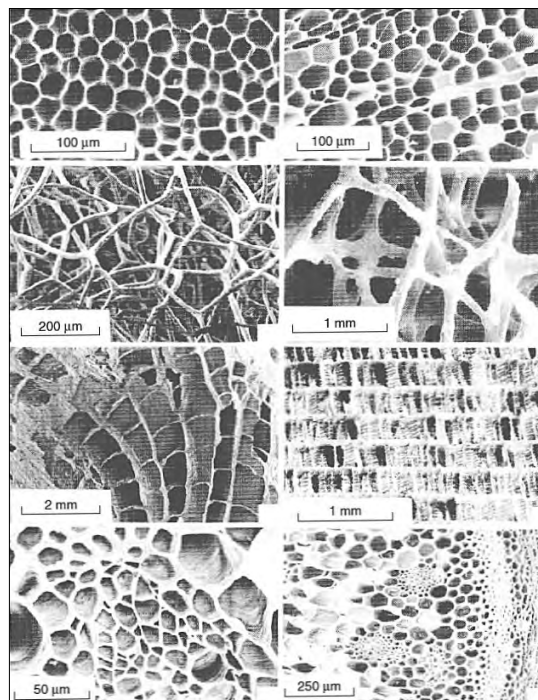
A cellás anyagok közül a műanyaghabok a legismertebbek: polisztirolhabok („hungarocell”), poliuretán- (PUR)-habok, műszivacsok, csomagolóanyagok. Azonban alkalmazhatóságuknak többek között tulajdonságaik erős hőmérsékletfüggése és az eleve kis szilárdságuk szab határt [2]. A fémhabok esetében ezek a hátrányok nem vagy



1. ábra. A szerkezeti anyagok egy lehetséges felosztása és jellegzetes példái



2. ábra. A hibrid anyagok alcsoportjai



3. ábra. Cellás biostruktúrák

kevésbé jelentkeznek. A fémhabok olyan könnyű, cellás anyagok, amelyeket a természet inspirált: pl. a parafa, a balsafa, a valódi szivacs, a szivacsos csont, a korall, a tintahalcsont és a pálmánövény-szár is hasonló szerkezetű (3. ábra) [1].

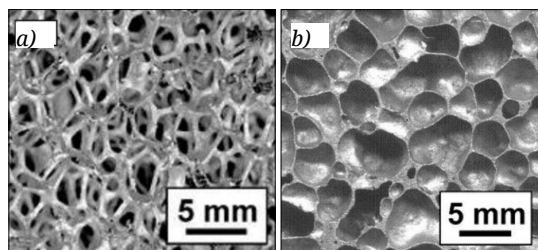
2. Fémalapú habok jellemzői

A fémhabok szerkezetük alapján két csoportba (4. ábra) oszthatók [3]:

- Nyitott cellás fémhabok, melyek üregei egybefüggőek, vázukat egymáshoz kapcsolódó cellaélek alkotják;
- Zárt cellás fémhabok, amelyekben az üreget cellafalak különítik el.

A fémhabok pontos(abb) azonosítása érdekében különbséget lehet tenni az általánosan fémhabnak nevezett anyag(változat)ok között [4]:

- Cellás fémek: a legáltalánosabb kifejezés, amely olyan fémtestre utal, amelyben gázzal telt üregek találhatóak, vagyis a fém fázis az anyagot cellákra osztja, amelyekben gáz fázis található.
- Pórusos fémek: a cellás fémek speciális típusa, melyekre egyfajta üreg jellemző, így a pórusok általában kerek és egymástól elkülönülnek.
- Megszilárdult fémhabok: A cellás fémek speciális osztálya, melyek folyékony fémhabokból



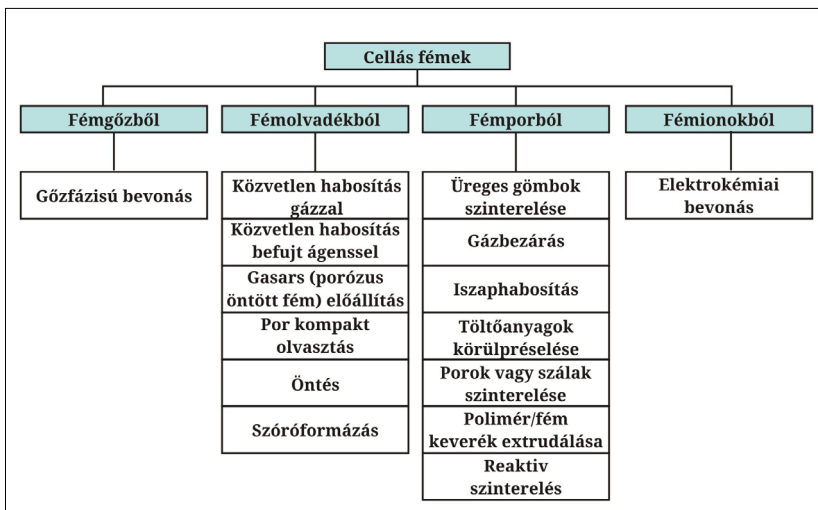
4. ábra. Nyitott és zárt cellás fémhab

keletkeznek, és így megszabott a morfológiájuk. A cellák zártak, kerek vagy poliéderek, és vékony fémréteg választja el őket.

- Fémszivacsok: a cellás fémek egy morfológiai fajtája, melyekben nyitott cellák találhatóak.

Az 5. ábra a cellás fémek gyártástechnológiai szempontú felosztását mutatja [5].

A fémhabok néhány mikrométeres vagy akár centiméteres nagyságú üregeket is tartalmazhatnak, és bennük a cellák falvastagsága igen széles skálán változhat, míg szerkezetüket tekintve hasonlóak a műanyaghabokhoz. A fémhabok sűrűsége lényegesen kisebb a tömör fémekéhez viszonyítva; átlagos sűrűségük a fém sűrűségének akár százada is lehet. A fémhabok egyik leggyakoribb jellemzője a relatív sűrűség, amely a fémhab sűrűségének és a fémhabot alkotó fém sűrűségének



5. ábra. Cellás fémek gyártástechnológiai szempontú felosztása

hányadosa, gyakran százalékosan megadva. A jelenleg előállított fémhabok relatív sűrűsége 0,1% és 50% között változik. A fémhabok sajátos fizikai és mechanikai tulajdonságaik kombinációjáról ismertek, ilyen tulajdonságok a relatíve nagy merevség, a kis sűrűség, a viszonylag nagy nyomószilárdság és a jó energiaelnyelő képesség [6].

A 6. ábra a jellegzetes halmazállapotú anyagokból képezhető keverékállapotokat foglalja össze, beleértve a habanyagokat is. Ezen heterogén (különböző részekből összeálló) anyagkeverékekben az egyik anyagminőség (ill. halmazállapot) nagyobb (domináns) arányban, a másik – finom és egyenletes (diszperz) eloszlásban – kisebb mértékben van jelen [7].

A felhasznált fémhabok zömmel alumíniumalapúak. Speciális előállítási technológiával elérhető, hogy az alumíniumban zárt üregek keletkezzenek, ezáltal szivacsos szerkezetű legyen az anyag.

Létrejövő keverékállapotok		Anyag, amit diszpergálunk		
		Gáz	Folyadék	Szilárd anyag
Anyag, amibe diszpergálunk	Gáz	Gázkeverék	Köd	Füst
	Folyadék	Hab	Emulzió	Szuszpenzió
	Szilárd anyag	Szilárd hab, celluláris anyag	Iszap gél	Porkeverék Beágyazott részecskék

6. ábra. Habanyagok a keverékállapotok között

Alkatrészek előállítása zárt szerszámban történik, ilyenkor a hab üregei a szerszám felületével érintkezve zárulnak, ezért sima, összefüggő lesz a felület. További alkalmazás vékony falú acélcsövek kiöntése habosított fémekkel. Mivel a fémhaboknak jó az energiaelnyelő és rezgéscsillapító képességük, a csövek merevítésére is kiválóan alkalmasak [8].

Lehetséges szendvicsszerkezetek készítése is fémhabok felhasználásával. Előnyös tulajdonságaik miatt felhasználhatók a karosszériaépítés során tartóoszlopok merevítésére, padlók készítésére és lökhárítók kialakítására. Nagy fajlagos felületük révén katalizátorok hordozóanyagaként és akkumulátorokban nagy felületű elektródként is funkcionálhatnak. Elektromos vezetőképességük kisebb, mint a hagyományos fémeké.

Pórusokba zárt gázzal történő habosításkor a nagy nyomású semleges gáz a fémpor pórusaiban csapdába esik, ezért nagy nyomású gáztérbe helyezik a fémport. Utána ezt a fém-gáz keveréket lemezzé hengerlik, miközben a tömített lemez-kamra fala tömör oldallapokat képez. A lemezt felhevítik, hogy a fémporrétegben lévő gáz kiterjedjen. Ezzel a módszerrel sajátos szendvicsszerkezetet, vagyis egyfajta kompozitot kapnak, melynek magja körülbelül 30%-os porozitású.

Mint innovatív anyag, az alumíniumhab komoly potenciált jelent kompozit-összetevőként való használatra. Ez a kompozit alumíniumhab szendvics, amely alumíniumlemezekből mint fedőrétegekből és alumíniumhabból mint magrétegből áll. Az alumíniumhab és a szendvicsszerkezet is teljesen újrahasznosítható és környezetbarát, mivel

egész térfogatában alumíniumból készül. Ezek a tulajdonságok nagyon jól használhatók a gépjárművek karosszériájához. Továbbá az építőipar, a repülőgépipar, a tengeri és a vasúti járműgyártás is nagy alkalmazási potenciált jelent.

3. A fémalapú habok roncsolásmentes-anyagvizsgálatai

A folytonossági hiányokat alkalmas vizsgálati módszerekkel kell kimutatni, amelyekkel azok vagy közvetlenül felismerhetőek, vagy valamilyen jelből lehet következtetni a jelenlétükre. Az egyes vizsgálatok mind módszerben, mind a nyerhető információtartalomban különböznek egymástól.

Alapvetően fontos annak szem előtt tartása, hogy univerzális anyagvizsgálati módszer nincs. Mindegyik eljárás csak bizonyos fajtájú és/vagy elhelyezkedésű folytonossági hiányokat tud biztosan kimutatni, vagyis az egyes roncsolásmentes vizsgálati módszerek egymást nem helyettesítik, hanem kiegészítik. Ezért egyes esetekben komplex vizsgálatra, vagyis több módszer párhuzamos elvégzésére lehet szükség.

A legfontosabb, iparilag alkalmazott roncsolásmentes vizsgálati eljárások:

- a sűrűség és a fizikai (termikus, elektromos, mágneses, optikai, akusztikai) tulajdonságok vizsgálata,
- a szemrevételezéses (vizuális) vizsgálatok (VT),
- a tömörségi vizsgálatok (LT),
- a folyadékbehatolásos vizsgálatok (PT),
- a mágnesezhető poros vizsgálatok (MT),
- az örvényáramos vizsgálatok (ET),
- az ultrahangos vizsgálatok (UT),
- a radiográfiai vizsgálatok (RT).

A vizsgálati módszerekkel szemben különböző műszaki és gazdaság(osság)i követelményeket támasztanak, az adott feladathoz megfelelő módszer kiválasztásában pedig elsődlegesen a feladat jellege a döntő. Vannak olyan követelmények is, amelyek részben ellentmondóak, és nem is egyformán teljesül(het)nek:

- lehetőleg gyors legyen, a folytonossági hiány(oka)t megbízhatóan kimutassa;
- egyszerű, helyszínen is elvégezhető legyen;
- lehetőleg ne igényeljen különleges biztonsági intézkedéseket;
- minimális előkészületi munkát igényeljen;
- a munkadarab állapotában semmiféle változtatást ne okozzon;
- a berendezés(ek) egyszerű(ek), hordozható(k) legyen(ek);

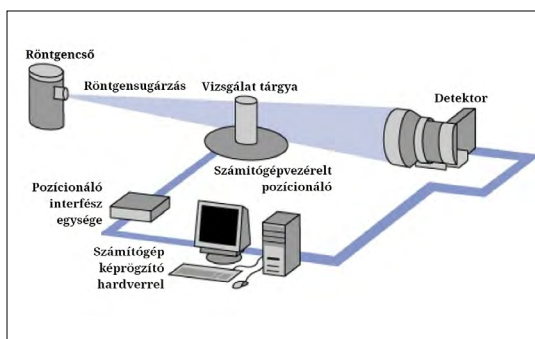
- az eredmények maradandó módon regisztrálhatók legyenek.

Szempontok a vizsgálati módszer kiválasztásához:

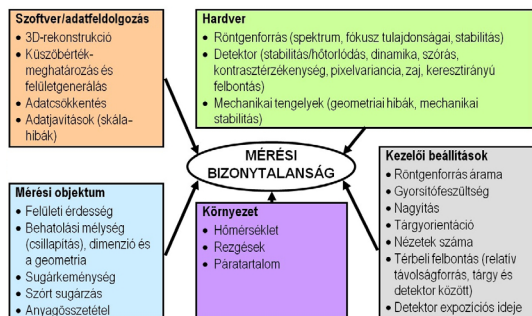
- alkalmasság a keresett folytonossági hiány megbízható kimutatására,
- a vizsgálati helyszín,
- a vizsgálandó gyártmány mérete, alakja, mozgathatósága,
- a vizsgálandó terület mérete, kialakítása, felületi finomsága, hozzáférhetősége,
- a vizsgálandó anyag fizikai és kémiai tulajdonságai,
- a vizsgálat dokumentálásával kapcsolatos igények,
- gazdaságosság.

A CT-vizsgálat számítógépes röntgentomográfia (computed tomography) [MSZ EN ISO 15708-1:2019] néven ismeretes, amely a radiológiai diagnosztika egyik ága. A tomográfia szó a szeletelésre utal, ugyanis a tomográfiai felvételeken a vizsgálat tárgya képzeletbeli szeletekre bontva látható. A számítógépes röntgentomográfia (az angol kifejezés első magyarítása nagyon zavaros lett – komputertomográfia, de a gyógyászati berendezések szabványainak mindmáig ez a kifejezés szerepel a magyar címében) a hagyományos radiográfiai technika továbbfejlesztése (7. ábra) [9].

A CT-készülékek tehát röntgensugárzást használnak a felvételek elkészítéséhez, de a sugárzással nem filmet exponálnak, hanem detektorok segítségével érzékelik azokat, majd a detektorokból nyert elektromos jelekből számítógép segítségével készül el a rekonstruált keresztmetszeti kép. A tomográfiai felvétel esetében vékony, síkszerű röntgensugárzási nyalábbal világítják át a vizsgált objektumot. Az objektum mögött elhelyezett detektor egy vonal mentén érzékeli, hogy a sugárzási nyalábból hol és mennyi nyelődött el.



7. ábra. Számítógépes röntgentomográfiai berendezés vázlata



8. ábra. CT-vizsgálatot befolyásoló tényezők

A sugárzási nyálábbal egy adott síkban több irányból is átvilágítják a testet, és a mért intenzitásgörbékből kibontakozik az adott síkban (születben) elhelyezkedő részletek rajza. A síkot ezután arrébb tolják és újra körbeforgatják. Az eljárás befejeztével a vizsgált test térbeli szerkezete feltérképezhető. Szerkezetten itt a röntgensugárzás-áteresztő képesség szempontjából megkülönböztethető részletek, vagyis a különböző sűrűségű anyagrészek elrendeződése értendő. A CT-vizsgálatot befolyásoló tényezőket foglalja össze a **8. ábra [10]**.

4. Következtetés

Az autóipar olyan irányba halad, amivel nagy hangsúlyt fektet a járművek tömegcsökkentésére és ezzel a károsanyag-kibocsátás minimalizálására. Ez a tömegcsökkentés főleg olyan új típusú anyagokkal érhető el, mint a nagy szilárdságú acélok és alumíniumötvözetek vagy a cellás anyagok, köztük a fémhabok. Ezek roncsolásmentes vizsgálatainak egy része lényegében „kvantitatív” jellegű, vagyis jelzi, hogy van adott számú (egy vagy több) folytonossági hiány, de a „minőségre” (fajtájukra) és térbeli kiterjedésükre vagy nem, vagy csak korlátozott érvényességgel ad információt, míg a vizsgálatok másik része kvantitatív és kvalitatív eredményű eljárás is egyben.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetet kíván mondani a Magyar Államnak, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak, valamint az Európai Uniónak a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00081. számú projekt támogatásáért.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Ashby Michael F.: *Materials Selection in Mechanical Design*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005.
- [2] García-Moreno F.: *Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production*. Materials, 9/2. (2016) 85. <https://doi.org/10.3390/ma9020085>
- [3] Sathurusinghe S. A. S. P., Herath K. R. B., Herath S. R.: *Elastic Properties of Open Cell Metallic Foams Using Finite Element Analysis and Homogenization Technique*. 45th IEP Convention 2012, 11.
- [4] Banhart J.: *Manufacturing Routes for Metallic Foams*. JOM, 52. (2000) 22–27. <https://doi.org/10.1007/s11837-000-0062-8>
- [5] Banhart J.: *Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams*. Progress in Materials Science, 46. (2001) 559–632. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5)
- [6] Kenesei P., Kádár Csi., Rajkovits Zs., Lendvai J.: *Fémhabok előállításának módszerei*. Anyagok Világa, 2/2. (2001).
- [7] Bagyinszki Gy.: *Anyagismeret és minősítés*. BMF Bánki Donát Gépészmérnöki Főiskolai Kar, Budapest, 2004.
- [8] Hareancz F., Kiss N.: *Alumíniumhabok ívhegesztésének vizsgálata*. Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok, 14/1. (2019) 61–69. <https://doi.org/10.14232/jtfgf.2019.1.61-69>
- [9] Computed Tomography, Iowa State University, Center for Nondestructive Evaluation. <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Radiography/AdvancedTechniques/computedtomography.xhtml> (2022. 01. 17.)
- [10] Cantatore A., Müller P.: *Introduction to Computed Tomography*. Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, 2011 March.

A ragasztóanyag kiválasztása mikroszakító kötőszilárdsági vizsgálatokhoz

Choosing the Adhesive for Microtensile Bond Strength Tests

Borhy Levente,^{1,a} Leveles Borbála,^{2,b} Kemény Alexandra^{1,c}

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország.

²Medicontur Orvostechikai Kft., Zsámbék, Magyarország.

^aborhy.levente@edu.bme.hu, ^bborbala.leveles@edu.bme.hu, ^ckemeny.alexandra@gpk.bme.hu

Abstract

Dental fillings are one of the most widespread minimal invasive procedures in modern restorative dentistry. Thanks to the advantages of recently developed filling materials, adhesive systems, and filling techniques, it is possible to create high strength, long-lasting dental fillings. Qualifying these structures is a complicated procedure; the most common method is the use of a microtensile bond strength test, for which specimens need to be formed and stabilised with adhesives in special jigs. During our research, three different cyanoacrylates were examined to find the ideal adhesive for bonding the metal and dentin and the metal and EverX short fibre composite, respectively.

Keywords: *composite dental filling, microtensile bond strength test, adhesive systems.*

Összefoglalás

A modern fogászatban a fogtömések alkalmazása az egyik legelterjedtebb minimálinvazív eljárás. Az egyre fejlettebb kompozit tömőanyagoknak, adhezív rendszereknek és tömési technikáknak köszönhetően nagy szilárdságú, időtálló fogtöméseket lehet elkészíteni. Ezen restaurációk minősítése bonyolult feladat, a legelterjedtebb módszer a mikroszakító kötőszilárdsági vizsgálat, amelynek elvégzéséhez a próbatesteket kell kimunkálni és azokat egyedi befogókba ragasztani. Kutatásunk során három különböző ragasztóanyagot vizsgáltunk meg, hogy meghatározzuk, melyikkel célszerű a fémbefogóhoz ragasztani a dentint, és melyikkel az EverX dentinpótló kompozitot.

Kulcsszavak: *kompozit fogtömés, mikroszakító kötőszilárdsági vizsgálat, ragasztórendszerek.*

1. Bevezetés

A fog helyreállításával foglalkozó anyagtudomány és a restauráció módszertana dinamikusan fejlődő tudományág. Az újszerű fogászati tömőanyagoknak és fogtömési technikáknak köszönhetően minden korábbinál nagyobb szilárdságú kompozit fogtöméseket lehet létrehozni [1, 2].

Ezekkel az újszerű anyagokkal akár egy lépésben, gyorsan, jó minőségű fogtöméseket lehet elkészíteni, ezzel szemben a hagyományos réteges feltöltéses technika időigényes. Az új típusú tömőanyagok és tömési módszerek különböző

igénybevételekre adott válaszaik számszerűsítésével összehasonlíthatóvá válnak [2].

Érdeemes tehát különböző típusú tömési technikákat és anyagokat vizsgálni, ugyanis a kész fogtömések mechanikai tulajdonságai számos faktortól függenek.

1.1. Fogtömések felépítése

A dentin, amely a fog koronájától a foggyökérig terjed, és a fog fő állományát alkotja, körülbelül 70% szerves, 18% szerves anyagból és 12% vízből tevődik össze. Ennek a szövetnek az összetétele és tulajdonságai lokálisan különbözhetnek [3, 4].

Egy újszerű, egyre nagyobb figyelmet nyerő szakterület a mély, egy lépésben nehezen tömhető üregek restaurálásához a biomimetikus megközelítés, amely során általában rövid üvegszál-erősítésű kompozitot alkalmaznak tömőanyagként. Tipikus biomimetikus megközelítés az olyan típusú anyagok kombinált használata adott szövet pótlására, amelyek tulajdonságai minél jobban megegyeznek az eredeti szövetével [5].

Az ilyen típusú fogtömések egyik legfontosabb tulajdonsága a dentin és a dentinpótló anyag közötti adhéziós kapcsolat. A nem megfelelő adhézió töméselváláshoz és másodlagos szuvasodáshoz vezethet, amelyek a fogtömések leggyakoribb tönkremeneteli okai [5, 6].

1.2. Vizsgálati módszer

Az egyik legelterjedtebb eljárás a dentin és a dentinpótló anyag közötti adhéziós kapcsolat minősítésére a kötőszilárdsági vizsgálatok elvégzése. E vizsgálatok közül az egyezményes, mikroszakító kötőszilárdsági vizsgálatot használják széles körben [7, 8].

Ez a módszer rendkívül kis méretű minták vizsgálatára alkalmas, így egy fogból több mintát is elő lehet állítani hozzá. A vizsgálat során leggyakrabban hasáb alakú próbatesteket alkalmaznak. Egy másik elterjedt módszer a homokóra alakú próbatestek alkalmazása, amelyekkel előre meghatározható a tönkremenetel helye, azonban sokszor korlátot szab a minták törékenysége [4, 6].

A fogtömések minősítésére a korszerű szakirodalomban is a mikroszakító kötőszilárdsági vizsgálatot alkalmazzák [9–11], így kutatásunk során az alkalmazott befogási módot dolgozzuk ki, ugyanis a szakirodalom nem részletezi a pontos lépéseket.

Az újszerű, biomimetikus fogtöméseknek nagy a kötőszilárdságuk, így vizsgálatuk során fontos, hogy a befogóba való rögzítés szilárdsága nagyobb legyen a dentin és az EverX közötti adhéziónál a fogtömés megfelelő vizsgálatához. Célunk mikroszakító kötőszilárdsági vizsgálatokat végezni egyes fogmintákon, amelyek különböző kereskedelmi forgalomban kapható cianoakrilát-alapú ragasztóanyagokkal fogászati vizsgálatokban alkalmazott befogókba vannak rögzítve. Ezek segítségével meghatározzuk, hogy mely ragasztókkal érdemes a foganyagot (dentin) és a dentinpótló kompozitot a fém befogóhoz kötni.

Kutatásunk során bölcsességfogakon és a fogorvosok által napi gyakorlatban használt tömőanyagot végeztük el a húzóvizsgálatokat.

2. Anyagok és módszerek

2.1. Felhasznált anyagok

A mikroszakító kötőszilárdsági vizsgálatokhoz háromféle, cianoakrilát-alapú pillanatragasztót alkalmaztunk.

Az első a Loctite Super Attak Power Easy (LSAPE) típusú, nagy viszkozitású géles ragasztó, amely kialakítása és állaga miatt rendkívül könnyedén kenhető, valamint nagy szilárdságú kötés kialakítására alkalmas ragasztóanyag.

A második a 3M Scotch-Weld Instant Adhesive PR100 (3M) típusú, kis viszkozitású ragasztóanyag, amely kifejezetten nehezen ragasztható polimerek kötésére alkalmas.

Végül pedig a Loctite Super Attak Brush On (LSABO) típusú, ecsetes kialakítású, kis viszkozitású pillanatragasztót használtunk.

Minden ragasztó esetében a fémfelületet acetonnal tisztítottuk, majd Toolcraft márkájú primerrel kezeltük, és a ragasztás végén aktivátorral gyorsítottuk a ragasztó megkötését.

Az EverX Posterior, rövid üvegszál-erősítésű kompozit tömőanyagot dentin pótlására alkalmazzák fogtömések elkészítése során. Ennek a kompozitnak a polimerizációs zsugorodása kismértékű, így résmentes kapcsolat kialakítására alkalmazzák.

A fogmintákat egészségügyi szempontból eltávolított bölcsességfogakból munkálták ki.

2.2. A minták előkészítése

Az eltávolított bölcsességfogakból ~1–1,5 mm oldalhosszúságú, ~8 mm magas, hasáb alakú próbatesteket munkáltunk ki a mikroszakító kötőszilárdsági vizsgálatokhoz. Ehhez Buehler IsoMet 1000 típusú, gyémánttárcsás vágógéppel első lépésben levágtuk a fog gyökerét, ezzel megnyitva a pulpaüreget, amelyet feltöltöttünk Cosmedent Insure White Opaque típusú fogászati kompozittal. Következő lépésben a rágófelszínnel merőlegesen síklapokat vágtunk, majd minden síklapból 2–3 db hasábot munkáltunk ki, ezzel előállítva a próbatesteket.

Az EverX kompozit adhéziós vizsgálatához egy speciális szerszám segítségével formába helyeztük a kompozitot, ott polimerizációs lámpa segítségével térhálósítottuk, majd a formából kivéve ezt több oldalról megismételtük. Következő lépésben a mintát méretre vágtuk, így elkészítve a fogmintákkal azonos méretű, hasáb alakú próbatesteket.

2.3. Mérési módszerek

A megfelelő ragasztóanyag kiválasztásához húzóvizsgálatokat végeztünk Instron 5965 típusú univerzális elektromechanikus anyagvizsgáló berendezésen, 5 kN-os erőmérő cellával és 1 mm/min keresztfejsebességgel.

A méréshez a mintákat a különböző pillanatragasztókkal rögzítettük egyezményes vizsgálati módszerek során használt befogókba.

A vizsgálat után nyíró- és húzófeszültséget is számítottunk. Azokban az esetekben, amikor a minta tönkremenetele bekövetkezett a mérés során, az anyagra jellemző húzófeszültségi értéket megkaptuk a minta keresztmetszetéből és maximális húzóerőből számítva. Amikor a minta kicsúszott a befogásból, akkor a befogón fekvő keresztmetszetéből és a befogás hosszából számítottunk nyírófeszültséget, amellyel a ragasztóanyagot minősítettük.

A mérés során célunk volt a mikroszakító kötészilárdság-vizsgálatokhoz olyan ragasztóanyag kiválasztása, amelynek a próbatesttel létrehozott adhéziója nagyobb nyíróterhelést bír el, mint amekkora húzóterhelést a ragasztóval rögzített minta.

3. Eredmények

Húzóvizsgálatot végeztünk el az előkészített, hasáb alakú próbatesteken mind a fogminták, mind az EverX kompozit esetében.

Háromféle ragasztóanyaggal 5-5 mintán végeztük el a vizsgálatokat mindkét mintatípussal.

Az **1. ábra** szemlélteti a vizsgálataink eredményeit.

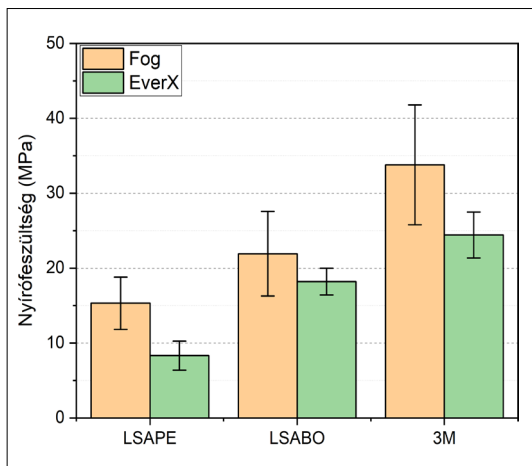
3.1. Bölcsességfogak vizsgálata

A vizsgálat számszerű eredményein felül érdemes megjegyezni, hogy az LSABO-ragasztó esetében az egyik minta elszakadt a mérés közben, a 3M esetében pedig mindegyik minta előbb szakadt el, mint hogy a ragasztott kötés ment volna tönkre.

3.2. Az EverX tömőanyag vizsgálata

A kvantitatív eredményeken felül fontos, hogy a 3M ragasztóval befogott minták esetében mindegyik minta elszakadt, az LSABO esetében egy mintát kivéve mindegyik elszakadt, az LSAPE alkalmazása során pedig minden alkalommal a ragasztott kötésnél következett be a tönkremenetel.

Az eredményekből megfigyelhető, hogy minden vizsgált ragasztóanyag nagyobb szilárdságú kötetést hoz létre a foggal, mint az EverX kompozittal, azonban a fog egyedisége miatt ezek az eredmé-



1. ábra. A vizsgált ragasztóanyagokkal kapott nyírófeszültség-értékek

nyek jobban szórnak. A 3M és LSABO ragasztóanyagok esetében az átlagosan elérhető nyíró kötészilárdság nagyobb, mint a számított érték, hiszen nem a kötés ment tönkre, hanem anyagban elszakadtak a minták.

Az elszakadt mintáknak köszönhetően meg tudtuk határozni a bölcsességfogak teherbírását és az EverX tömőanyag szakítószilárdságát is. A fogak teherbírása 74 ± 16 MPa. Az EverX minták esetében 63 ± 6 MPa szakítószilárdsági értéket kaptunk.

4. Következtetések

Vizsgálati eredményeink alapján jól összehasonlíthatóvá válnak az egyes ragasztóanyagok mind a foggal, mind az EverX-szel való adhéziójának erősségét tekintve. Mindkét esetben egyértelműen látszik, hogy a 3M típusú ragasztóanyag értékei nagymértékben felülmúlják a többi, általunk vizsgált ragasztó kötési erősségének értékeit; továbbá, hogy a vizsgált ragasztóanyagok közül ez a legalkalmasabb első osztályú fogtömések mikroszakító kötészilárdsági vizsgálatára.

Eredményeink megmutatják, hogy bár minden kutatócsoport cianoakrilát alapú ragasztót használ a fogtömések anyagvizsgálatához, még megfelelő minta-előkészítéssel is időt kell szánni a megfelelő ragasztó kiválasztására.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a IV/8518-1/2021/EKU ügyiratszámú TUKEB-engedély elfogadta. Az eredmények közzétételéhez anyagi hozzájárulást nyújtott a BME Tudományos Diákköri Bizottságának TDK-pályázata.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Salim F. M.: *Tribological and mechanical characteristics of dental fillings nanocomposites*. Energy Procedia, 157. (2019) 512–521.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.215>
- [2] Ajaj R. A., Farsi N. J., Alzain L., Nuwaylati N., Ghurab R., Nassar H. M.: *Dental bulk-fill resin composites polymerization efficiency: A systematic review and meta-analysis*. Journal of Composite Science, 5/6. (2021) 149.
<https://doi.org/10.3390/jcs5060149>
- [3] Giannini M., Soares C. J., De Carvalho R. M.: *Ultimate tensile strength of tooth structures*. Dental Materials, 20/4. (2004) 322–329.
[https://doi.org/10.1016/S0109-5641\(03\)00110-6](https://doi.org/10.1016/S0109-5641(03)00110-6)
- [4] Hosoya Y., Kawada E., Ushigome T., Oda Y., Garcia-Godoy F.: *Micro-tensile bond strength of sound and caries-affected primary tooth dentin measured with original designed jig*. Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials, 77B/2. (2006) 241–248.
<https://doi.org/10.1002/jbm.b.30433>
- [5] Garoushi S., Gargoum A., Vallittu PK., Lassila L.: *Short fiber-reinforced composite restorations: A review of the current literature*. Journal of Investigative and Clinical Dentistry, 9/3. (2018) e12330.
<https://doi.org/10.1111/jicd.12330>
- [6] El Mourad A. M.: *Assessment of Bonding Effectiveness of Adhesive Materials to Tooth Structure using Bond Strength Test Methods: A Review of Literature*. The Open Dentistry Journal, 12. (2018) 664–678.
<https://doi.org/10.2174/1745017901814010664>
- [7] De Munck J., Luehrs A. K., Poitevin A., Van Ende A., Van Meerbeek B.: *Fracture toughness versus micro-tensile bond strength testing of adhesive-dentin interfaces*. Dental Materials, 29/6. (2013) 635–644.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2013.03.010>
- [8] Sano H., Chowdhury A., Saikaew P., Matsumoto M., Hoshika S. & Yamauti M.: *The microtensile bond strength test: Its historical background and application to bond testing*. The Japanese Dental Science Review, 56/1. (2020) 24–31.
<https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2019.10.001>
- [9] Alhenaki A. M., Attar E. A., Alshahrani A., Farooq I., Vohra F., Abduljabbar T.: *Dentin bond integrity of filled and unfilled resin adhesive enhanced with silica nanoparticles - an SEM, EDX, micro-Raman, FTIR and micro-tensile bond strength study*. Polymers (Basel), 13/7. (2021) 1093.
<https://doi.org/10.3390/polym13071093>
- [10] Dao Luong M. N., Shimada Y., Turkistani A., Tagami J., Sumi Y., Sadr A.: *Fractography of interface after microtensile bond strength test using swept-source optical coherence tomography*. Dental Materials, 32/7. (2016) 862–869.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.03.019>
- [11] Ahmed M. H., De Munck J., Van Landuyt K., Peumans M., Yoshihara K., Van Meerbeek B.: *Do universal adhesives benefit from an extra bonding layer?* Journal of Adhesive Dentistry, 21. (2019) 117–132.
<https://doi.org/10.3290/j.jad.a42304>

Nagy teljesítményű szálképző berendezés tervezése

Design of a High Performance Fiber-producing Machine

Fábián Hunor,¹ Gergely Attila²

¹Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Fejlett Mechatronikai Rendszerek Szak, II. év, Marosvásárhely, Románia, fabianhunor2@gmail.com

²Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, agergely@ms.sapientia.ro

Abstract

The aim of this work is to design a high-productivity, continuously operating fiber producing device utilizing the centrifugal force to yield polymeric nanofibers. The requirements for the design were 1) to provide a capillary-to-collector distance of 50-200 mm that could be adjusted automatically, 2) allow the rotational speed of the spinneret to be changed in the range of 0-25000 1/min and have continuous feeding. The equipment will form the basis of several research topics, such as the creation and study of solid dispersions of drugs, the development of pressure sensors, and the creation of porous filter membranes.

Keywords: *design, centrifugal spinning, , nanofiber, control system.*

Összefoglalás

A munka célja egy nagy termelékenyséű, folyamatos működésű, centrifugális erőt kihasználó szálképző berendezés tervezése volt polimer nanoszálak előállítására. A berendezés működési elvében hasonló a szakirodalomban leírt berendezésekhez, viszont teljes mértékben saját fejlesztés eredménye. A tervezési követelmények között az automatikusan állítható kapilláris-kollektor távolság, 50–200 mm, a forgófej magas fordulatszám, 0–25000 1/min, és folyamatos üzemű működés szerepel. A berendezés számos kutatási téma alapját képezi majd, mint például gyógyszeres, szilárd diszperziók megalkotása és tanulmányozása, nyomásmérő szenzorok fejlesztése, porózus szűrő membránok létrehozása.

Kulcsszavak: *tervezés, centrifugális szálképzés, nanoszálak, vezérlés.*

1. Bevezetés

A nanotechnológia a 0,1–100 nm-es mérettartományba (a nanoskálára) eső anyagok jelenségeinek és funkcióinak tanulmányozásával foglalkozó tudományterület. A nanométer a hossz egy olyan mértékegysége, amely a méter egymilliárd része [1, 2]. A nanométeres tartományban az anyagszerkezetek szokatlan és különleges tulajdonságai a makroszkálás kiterjedésű anyagokhoz képest a szerkezetükből adódik. Ezek az anyagok újszerű tulajdonságai az apró méreteikből erednek, amelyek szokatlan mechanikai, termikus, biológiai, optikai, mágneses és elektromos tulajdonságokká alakulnak át [3].

A polimer szálakat különböző területeken alkal-

mazzák, mint például akkumulátorok és üzemanyagcellák, kondenzátorok, tranzistorok és diódák, kompozitok repülőgép- és űrszerkezetekhez, gyógyszeradagolás és szövettechnika.

Nanoszál gyártására számos technika létezik. Ezek közé tartozik többek között a kétkomponensű kisajtolás, a fázisátvitel, a sablon-szintézis, a húzás, az elektrosztatikus szálképzés és a centrifugális szálképzés [4].

Az elektrosztatikus szálképző eljárás egy elterjedt módszer a nanoszálak előállítására; előnye, hogy a szálátmérő jellemzően a mikrométernél kisebb mérettartományba esik, gyors, és számos polimerből képes nanoszál paplant előállítani.

Elektrosztatikus szálképzéssel alapvetően polimerek oldatából vagy olvadákból hozhatunk

létre nanoszálakat. Előbbinél előnyös az alacsony üzemeltetési hőmérséklet, valamint lehetővé teszi hőmérséklet-érzékeny anyagok feldolgozását, míg utóbbinál a nanoszálak tisztán a polimerből, oldószermentesen állíthatók elő, ami sok esetben komoly környezetvédelmi előnyökkel jár [5]. Az elektrosztatikus szálképzés egy előnyös eljárás, mindazonáltal van néhány hátránya, például a magas elektromos tér alkalmazásának szükségessége, kiváló dielektromos tulajdonságokkal rendelkező polimer oldatok használata, és nem utolsósorban a kis termelékenység, kihozatal.

A centrifugális szálképző eljárást nanoszálak előállítására a tudományos szakirodalomban a 2010-es években kezdték el használni. A forgómozgás következtében a polimeroldat kapillárison áramlik ki, létrehozva a polimeroldat-sugarat, mely egy kollektor felé halad a centrifugális erő hatására. A folyamat során a polimeroldat-szálból az oldószer elpárolog, és a megszilárdult polimernanoszál a kollektoron halmozódik fel. Az eljárás egyszerűségéhez már laboratóriumi méretek mellett is nagy teljesítmény társul, 60 g/(óra×kapillaris) [6].

2. A centrifugális szálképző bemutatása

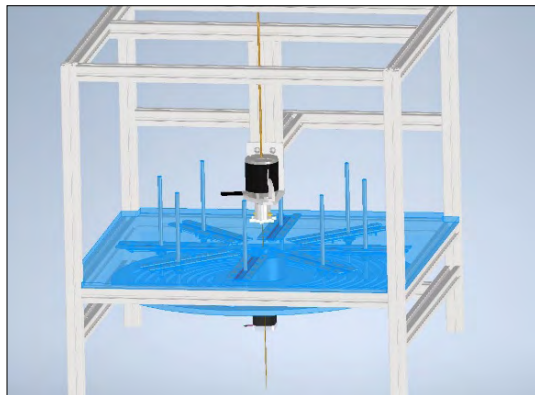
2.1. A tervezési feladat bemenő adatai

A tervezett berendezés működésének elve nagyon hasonlít az iparban használatos szálképző működési elvéhez. A cél a berendezés megvalósításával a Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem Marosvásárhelyi Karának Polimer Laboratóriumi eszköztárának bővítése, mely használható oktatásra és kutatásra is. További cél az, hogy a berendezést folyamatos üzemben lehessen használni, hőmérséklet- és páratartalom-mérést biztosítson, a forgófej-fordulat szabályozható, maximális értéke pedig ~30 000 1/min legyen. További elvárások a cserélhető kapillaris és a kollektor rendszer átmérőjének változtatása.

2.2. A gép felépítése

2.2.1. Vázszerkezet

A gép vázszerkezete 30×30 mm-es, Bosch Rexroth, eloxált alumíniumprofilból készült, mely a szükséges mechanikai terhelésnek megfelel, és relatíve könnyen szerelhető. A centrifugális szálképzéshez használt oldószeres esetleges korróziós hatásának ellenáll. Méreteit tekintve 650×650×650 mm³-es kocka forma, melynek munkatere 650×650×430 mm³.



1. ábra. A tervezett szálképző berendezés 3D modellje



2. ábra. Az APS 6374 típusú, háromfázisú BLDC-motor

2.2.2. Háromfázisú motor

A választott motor egy APS 6374 típusú BLDC-motor (2. ábra), 3200 watt teljesítmény leadására képes, és maximális fordulatszáma 38400 1/min. Esetünkben a motort maximálisan 48V feszültséggel tápláljuk. Egy megfelelő, háromfázisú motorvezérlő fogja a fordulatszám-szabályozást ellátni.

2.2.3. Motorvezérlés

A kefe nélküli egyenáramú motor (BLDC) vagy elektronikus kommutációjú, egyenáramú motor (ECDC) egy szinkron villanymotor, egyenáramú táplálással (DC) és elektronikus vezérelt kommutációs rendszerrel a kefes, mechanikus kommutáció helyett. Az ilyen motorokban az áram és a nyomaték, a feszültség és a fordulatszám egyenesen arányos.

Egy BLDC-motorban a tekercsek (elektromágnesek) nem mozognak; helyettük az állandómágnesek forognak és az armatúra marad nyugvó. A kefe-kommutátor rendszert felváltja egy elektronikus vezérlő. A vezérlő hasonlóan osztja el az áramot, mint ahogy az egyenáramú kefes motornál történik, de ez egy félvezetős áramkör a kefe-kommutátor rendszer helyett.

2.2.4. Forgófej

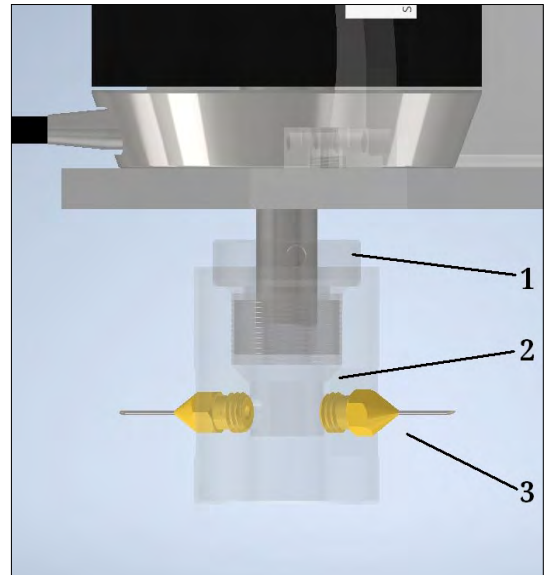
A szálképzésért felelős forgófej a motor tengelyére van rögzítve. A polimer oldat fejbe történő juttatását egy fecskendőpumpa biztosítja egy sárgaréz csövön keresztül. A motor tengelyén hosszirányba egy 5 mm átmérőjű furat van kialakítva, amely lehetővé teszi az oldatfejbe történő fecskendezését. A fej két részből tevődik össze a megfelelő tisztíthatóság és könnyed szerelhetőség érdekében. A tengelyhez csatlakozó rész, 1-es a **3. ábrán**, szorító illesztéssel van rögzítve a tengelyre, illetve két hernyócsavarral van átlósan lebiztosítva, hogy ne tudjon a működésből adódó rezgések miatt idővel meglazulni. A forgófej alsó része, 2-es a **3. ábrán**, a felső részhez menettel kapcsolódik, míg a polimer oldat kiáramlását biztosító kapillárisok az alsó rész palástfelületén kapnak helyet, 3-as a **3. ábrán**.

2.2.5. Szálgyűjtő

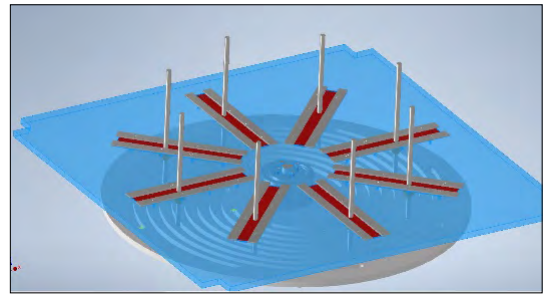
A polimer szálakat a kollektor fogja felfogni, ezáltal az gyűjti össze. A kollektorrudak egy kör mentén helyezkednek el, melynek átmérője változtatható. Működését tekintve hasonló az esztergagépen található tokmányhoz, melyet a darabok befogására használnak. Nyolc db rozsdamentes acélrúd alkotja a kollektort, körszimmetrikusan elhelyezve az asztalon. A mechanizmus két fő egységből tevődik össze. Egy megvezető részből, amely áll, és lehetővé teszi a kollektor rúdjaiknak az elmozdulását sugár irányba, illetve egy forgó részből, melyen nyolc archimédeszi spirál található. Az archimédeszi spirál egyenletét felhasználva a forgórész elfordulási szögéből ki lehet számolni a kollektorrudak pontos helyzetét a forgófejhez képest.

2.2.6. A kollektor hajtása

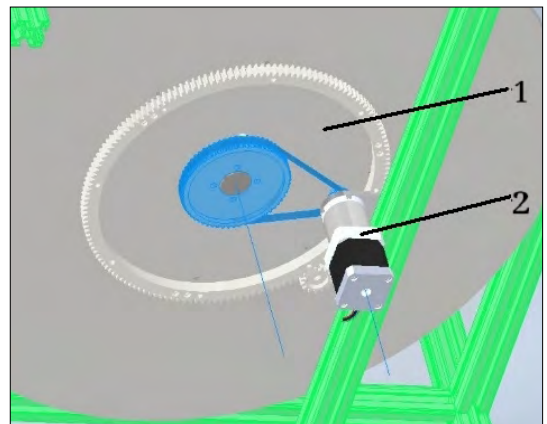
A kollektor forgórészét egy fordulatszám-csökkentővel ellátott léptetőmotor hajtja, 1-es az **5. ábrán**. A fordulatszám-csökkentő áttételi aránya $i = 50$. A motor és a spirál közt egy fogasszíjas hajtás található, 2-es az **5. ábrán**, $i = 14$ áttételi aránnyal; ezáltal biztosítva a megfelelő nyomatékot.



3. ábra. A szálképzést végző forgófej 3D-s modellje: 1 – felső rész, 2 – alsó rész, 3 – kapilláris



4. ábra. Változtatható kollektor



5. ábra. A kollektor hajtása: 1 – léptetőmotor, 2 – fogasszíjas hajtás

2.2.7. A léptetőmotor vezérlése

A léptetőmotor vezérlését egy DM332T-típusú, digitális léptetőmotor-vezérlő végzi. Azért esett erre a típusú vezérlőre a választás, mert ipari felhasználásra van tervezve, megbízható, és viszonylag könnyű programozni.

A bipoláris léptetőmotor bekötődik a megfelelően felcímkézett csatlakozókra. A „PUL” csatlakozó a lépésekért felel, a „DIR” csatlakozó a forgásirányért felelős, az „ENA” csatlakozó pedig az 5 V-os táplálást biztosítja.

2.2.8. A központi vezérlőegység

A centrifugális szálképző berendezés egységeinek a vezérlésére egy PLC-t használunk.

A PLC szabványosított be- és kimenetei, valamint kompakt felépítése tesz lehetővé az egyszerű megépítést, az üzembiztos működést, illetve a program módosításával a működés későbbi megváltoztatását. A centrifugális szálképző berendezéshez egy Siemens Simatic S7-300 CPU PLC-t használunk.

4. Következtetések

Következtetésképpen elmondható, hogy a bemutatott tervezési munka egy folyamatos üzemű, automatizált centrifugális szálképző berendezést eredményez, mely követi a költséghatékonyság elvét.

Szakirodalom

- [1] Nalwa H. S.: *Handbook of nanostructured materials and nanotechnology*. Academic press, San Diego 2000.
- [2] Ko F. K., Wan, Y.: *Introduction to Nanofiber Materials*. Cambridge University Press, United Kingdom, Cambridge 2014.
- [3] Laurencin C. T., Nair L. S.: *Polyphosphazene Nanofibers for Biomedical Applications: Preliminary studies*. NATO Science Series II, Mathematics, Physics and Chemistry, 169. (2004) 283–302.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2550-1>
- [4] Alghoraibi I., Alomari, S.: *Different methods for nanofiber design and fabrication*. In Handbook of nanofibers (eds.: Barhoum A., Bechelany M., Makhlof A.), Springer International Publishing, 2018. 1–46.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-42789-8_11-2
- [5] Brown T. D., Dalton P. D., Hutmacher D. W.: *Melt electrospinning today: An opportune time for an emerging polymer process*. Progress in Polymer Science, 56. (2016) 116–166.
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2016.01.001>
- [6] Ren L., Ozisik R., Kotha S. P.: *Rapid and efficient fabrication of multilevel structured silica micro/nanofibers by centrifugal jet spinning*. Journal of Colloid and Interface Science, 425. (2014) 136–142.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.03.039>

Térdimplantátumok kopásának modellezése

Wear Modelling of Total Knee Replacements

Fekete Gusztáv,¹ Tej Singh,² Jánosi Endre³

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Informatikai Kar, Savaria Műszaki Intézet, Szombathely, Magyarország
¹fg@inf.elte.hu ²sht@inf.elte.hu ³je@inf.elte.hu

Abstract

Beside prosthesis loosening, wear is the mechanical factor that most significantly influences the lifetime of total knee replacements (TKRs), which can only be described by a number of interrelated parameters. The examination of the wear occurring in TKRs is mostly carried out as a combination of experiments and mathematical modeling. The experiment can provide the real magnitude of wear, while the model is intended to mathematically describe the relationship between wear and the wear-inducing parameters. On the one hand, this study focuses on the mathematical description of wear as a natural-technical phenomenon, presenting the most important analytical and numerical models, while also providing an open view on exciting questions that still await answers.

Keywords: wear, knee joint, prosthesis, Archard wear model.

Összefoglalás

A protéziskilazulást követően a kopás a térdízületi implantátumok élettartamát legjelentősebben befolyásoló mechanikai faktor, amelyet csupán számos, egymással összefüggő paraméterrel lehet leírni. Implantátumok kapcsolatakor létrejövő kopás vizsgálatát célszerűen kísérletekkel és matematikai modellezéssel végzik, ahol a kísérlet kimutathatja a valóságos kopás nagyságát, míg a modell a paraméterek és a kopás közötti kapcsolatot hivatott matematikailag leírni. E tanulmány egyrészt a kopás mint természeti-műszaki jelenség matematikai leírására helyezi a hangsúlyt, bemutatva a legfontosabb analitikus és numerikus modelleket, másrészt olyan nyitott, izgalmas kérdéseket ismertet, amelyek még válaszra várnak.

Kulcsszavak: kopás, térdízület, protézis, Archard-modell.

1. Bevezetés

Annak ellenére, hogy a kutatók és protézisgyártó cégek közös munka árán megbízhatóbb és hatékonyabb implantátumokat hoznak létre, számos esetben megy tönkre a protézis. A főbb okok, amelyek miatt protéziscsere indokolt, az ízület elfertőződése, az implantátum kilazulása, valamint az implantátumban megjelenő nem megengedhető szintű kopás. A kopás több okból is kialakulhat az ízületben. Egyrészt magának az ízületnek az inkongruenciája (egybevágóságának hiánya) miatt, vagy az ízület természetes instabilitásából eredően.

A kopás maga egymással többszörösen összefüggő paraméterekkel leírható jelenség, amelyet

rendszerként kell kezelni, és nem csupán egy anyagjellemzőként [1].

Fontosságát ki kell emelni, mivel ez az a mechanikai faktor, amely legnagyobb mértékben befolyásolja az implantátum élettartamát [2, 3], valamint mértéke erősen függ az ízületben lejátszódó lokális kinematikától [4, 5].

A kopást direkt módon számos paraméter befolyásolja. Ezek közül a legfontosabbak a súrlódási út hossza, a terhelés és a relatív kopási tényező.

A kopást mint jelenséget komplex módon, kísérletekkel és matematikai modellek kombinációjával a legcélszerűbb vizsgálni. Fontos megemlíteni a kísérletekhez tartozóan, hogy vannak olyan paraméterek, amik a mérések során szerepelnek, mint az állítható paraméterek, azonban a mate-

matikai modellek nem veszik őket figyelembe.

Ilyen például a csúszva-gördülési tényező (S/R), amely egy 0 és 1 között változó érték. Ha értéke 0, akkor tisztán gördül a két felület egymáson, ha 1, akkor tisztán csúszik. A kettő között pedig a csúszás és gördülés egyenesen jelenik meg.

Ennek a tényezőnek a nagyságát általában 0 és 40% között alkalmazzák pin-on-disc, ball-on-disc vagy térdszimulátoron végzett tribológiai tesztek során [6, 7], mivel a korábbi elméleti modellek eredményei ezt sejtették [8, 9].

Ezen munkák eredményei egyszerű geometriájú kapcsolatok esetén, mint például a pin-on-disc és ball-on-disc típusú tesztek, jól alkalmazható, mivel itt egy sima lapos felület (pin) vagy egy gömbfelület (ball) csúszik és gördül egy lemez felületén, így a konstans csúszva-gördülés feltétele megfelelő kinematikai leírást biztosít.

Azonban ez a feltétel már nem áll fenn, ha a geometria összetett. A témához kapcsolódó legfrissebb eredmények azt mutatják, hogy térdprotézisekre nem alkalmazható az állandó csúszva-gördülési tényező [10, 11], mivel az összetett geometria a lokális mozgásokat is roppant kaotikussá teszi.

Egy másik, különösen fontos paraméter, amelyet mindenképpen ki kell emelni, az ún. keresztirányú nyírási tényező (cross-shear ratio, röviden CSR). Ez a paraméter az ultranagy molekuláris súlyú polietilének (UHMWPE) protézisekben való alkalmazásánál jelent meg, mivel egy speciális „mozgásfüggő” tulajdonsággal bír. A tibiális részt a térdprotéziseknél UHMWPE-ből hozzák létre, míg a femorális részt rozsdamentes acélból. Amikor a femorális és a tibiális rész kapcsolatba kerül egymással, akkor a csúszás hatására a polietilén molekuláinak orientációja, irányultsága megváltozik, és a csúszás iránya felé rendeződik. A molekulák ilyenfajta rendeződése felületi keményedést okoz, ami miatt ebben a kiténtetett irányban az anyag kopási ellenállása megnő.

Azonban míg az egyik irányban az anyag kopási ellenállása megnő, a rá merőleges irányban erősen lecsökken. Ezt az arányt fejezi ki a keresztirányú nyírási tényező, ami az irodalomban gyakran a relatív kopási tényezővel van függvénykapcsolatban [12].

Ennek a tanulmánynak a célja, hogy betekintést nyújtson a protézisek kopásának matematikai modellezésébe. A cikkben áttekintjük az irodalomban leggyakrabban alkalmazott modelleket, valamint egy már alkalmazásban lévő modell létrehozásának leírását.

2. Modellek

A legtöbb szerző egy általánosan alkalmazott kopásmodellből indul ki vizsgálódásai kezdetén. Ez az ún. Archard-modell [13].

$$dW = k \cdot F_N \cdot ds, \quad (1)$$

ahol a k az ún. fajlagos kopási tényező (mm^3/Nm), amely egy anyagtól függő állandó, F_N az összeszorított felületek között fellépő erő, ds pedig a pillanatnyi csúszó ívhossz.

Az Archard-modellt egyszerűsége ellenére továbbra is széles körben használják a mértékadó irodalomban mint kiinduló modellt.

Természetesen ezen formájában még csak távoli becslést képes adni, emiatt a szerzők további paraméterekkel egészítik ki a modellt, mint pl. a korábban említett keresztnyírási tényező, csúszva-gördülési tényező vagy súrlódási tényező. Megjegyzendő, hogy egyes szerzők, terhelés gyanánt nem koncentrált erőt (F) definiáltak a modelljükben, hanem felületi nyomást (p).

Az 1. táblázatban összefoglaltuk az utóbbi idők leggyakrabban alkalmazott és hivatkozott kopásmodelljeit, amelyeket protézisek kapcsolatakor használtak.

1. táblázat. Kopásmodellek

Modell	p/F	s	CSR	S/R	μ
Archard [13]	P	o	x	x	x
Hussin [14]	P	o	x	x	x
Innocenti [15]	P	o	x	x	o
Turell [16]	p	o	o	x	o
O'Brien [17]	p	o	o	x	o
Abdelgaied [18]	F	o	o	x	o
Fekete [19]	F	o	x	o	o

A táblázatban összegyűjtve láthatjuk, hogy a szerzők többsége nem minden paramétert vett figyelembe (x), hanem a legjobb esetben három paraméterrel egészítette ki a modelljét az eredeti Archard-egyenlethez képest.

A következő részben bemutatjuk egy módját, hogy miként lehet bővíteni, továbbfejleszteni egy alapmodellt.

3. Modellalkotás

3.1. Analitikus modell létrehozása

Első lépésként kezdjük a csúszva-gördülési tényező figyelembevételét a kopási egyenletben. A pillanatnyi csúszási ívhosszat fel lehet írni a csúszási sebesség és az idő szorzataként is.

$$ds = v_{csúszás}(t) \cdot dt \quad (2)$$

Korábbi tanulmányunk [20] alapján a csúszva-gördülést, ha pillanatnyi ívhosszak helyett pillanatnyi sebességekre értelmezzük, a következő összefüggés szerint is használhatjuk:

$$S/R(t) = \frac{v_{CTt}(t) - v_{CFt}(t)}{v_{CTt}(t)}, \quad (3)$$

ahol v_{CTt} és v_{CFt} a kontaktpontban értelmezett tangenciális sebesség a tibiára, illetve a femorra nézve. Ezen sebességek különbsége adja a csúszási sebességet ($v_{CTt} - v_{CFt} = v_{csúszás}$). Ha ezt a kifejezést rendezzük a csúszási sebességre, és visszahelyettesítjük az (1) egyenletbe:

$$dW = k \cdot F_N \cdot v_{CTt} \cdot S/R(t) \cdot dt, \quad (4)$$

akkor megkapjuk a kiegészített Archard-egyenletet, amelyben a csúszva-gördülés hatását is figyelembe vesszük.

Vegyük most figyelembe a súrlódási tényező hatását is a következőképpen. A femorális és tibiális felületek közötti kopási mechanizmusát abrazív felületkezelés során a keményebb fém femorális része belevájódik a lágyabb polietilén felszínbe (1. ábra).

Abrazív kopás esetén a súrlódó erőkomponens olyan nagyságú nyírófeszültséget okoz a felületen, amely miatt apró darabok válnak le a felületről. Emiatt a kényszererő súrlódási komponense az, amit figyelembe kell venni a kopási egyenletnél. Ezt a komponenst az egyszerű Coulomb-törvény segítségével közelíthetjük:

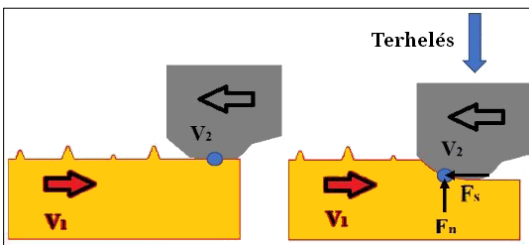
$$F_s = \mu_k \cdot F_N, \quad (5)$$

amit ha visszahelyettesítünk a (4) egyenletbe, a következő összefüggést kapjuk:

$$dW = k \cdot \mu_k \cdot F_N \cdot v_{CTt} \cdot S/R(t) \cdot dt \quad (6)$$

Ezáltal létrehoztunk egy olyan modellt, amely rendelkezik a kopást legerősebben befolyásoló tényezőkkel, kivéve a keresztirányú nyírási tényezőt.

Ezt a tényezőt is figyelembe kívánjuk venni a jövőben egy következő modellezési lépésként.



1. ábra. Abrazív kopás ábrázolása

3.1. Numerikus modell létrehozása

Ahhoz, hogy egy térdprotézis két oldalán (laterális és mediális) meghatározhassuk a kopás alakulását, szükséges figyelembe venni a geometriát is. Ezt analitikus módon roppant nehéz kezelni, mivel meg kell határozni a femorális és tibiális rész kapcsolata között fellépő összeszorító erő függvényét a protézis mozgása során.

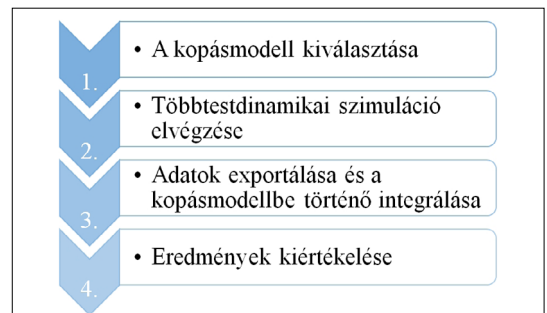
Ezen nehézség miatt célszerű létrehozni egy többtestdinamikai rendszert, és egy célszoftver segítségével meghatározni a szóban forgó erőket. Ezt a következő lépésekben lehet elvégezni (2. ábra).

Első lépésként kiválasztjuk a kopásmodellt, amely jelen esetben a (6)-os egyenlet lesz. Ez egy lineáris, elsőrendű, közönséges differenciálegyenlet. Az egyenlet megoldásához, vagyis a kopástérfogat számításához szükségünk van a többtestdinamikai szimulációkból a meghatározott összeszorító erőre a tibia laterális és mediális oldalán.

Vizsgálódásainkhoz három különböző protézisgeometriát használtunk, amelyeknél cél volt egyrészt megállapítani a kopás nagyságát a protézisek tibiális részén, másrészt osztályozni, hogy melyik protézis esetén magasabb a tönkremenetel esélye (3. ábra).

A protézisgeometriákat felhasználva létrehoztunk a többtestdinamikai modelleket az MSC ADAMS-ben (4. ábra).

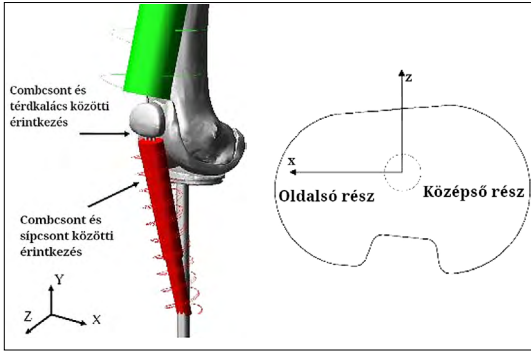
A peremfeltételeket minden modellre azonosan alkalmaztuk.



2. ábra. A kopás számítási algoritmus



3. ábra. A protézisgeometriák



4. ábra. A többtestdinamikai modell

A szimuláció elindítása után a tibiális rész laterális és mediális oldala érintkezik a femorális rész felületével. Az MSC.ADAMS egyidejűleg tárolja az érintkezési pontokat és erőket a későbbi kiértékelés céljából.

A kapott helyvektorok lehetővé teszik a laterális és a mediális oldalak, valamint az érintkezési erők elhelyezkedésének megkülönböztetését a felületeken.

Ezek az erőfüggvények, az idő függvényében, bemenetként szolgálnak a (6)-os egyenlethez, amelynek a számítását a következőképpen végeztük el:

$$dW_{lat.} = k \cdot \mu_k \cdot F_{cn,lat}(t) \cdot v_{CTt}(t) \cdot S/R(t) \cdot dt \quad (7)$$

$$dW_{med} = k \cdot \mu_k \cdot F_{cn,med}(t) \cdot v_{CTt}(t) \cdot S/R(t) \cdot dt, \quad (8)$$

ahol az $F_{cn,med}$ és $F_{cn,lat}$ a szimulációkból kapott erők. A kopásfüggvények létrehozása után az időt mint változót felcseréltük a behajlítási szögre (α).

4. Eredmények

Az eredmények kiértékeléséhez létrehoztunk olyan paramétereket, amelyekkel a kopás nem csak számszerűsíthető, hanem mélyebb betekintést nyújt a kopás térdre gyakorolt fiziológiai hatásába.

A laterális és mediális oldali kopás mellett bevezettünk egy új mennyiséget, az ún. teljes kopás nagyságát:

$$TW(\alpha) = (W_{med.}(\alpha) + W_{lat.}(\alpha)) \quad (9)$$

továbbá a relatív laterális és mediális kopás nagyságát:

$$RW_{lat.}(\alpha) = \frac{W_{lat.}(\alpha)}{TW(\alpha)} \cdot 100 \quad (10)$$

$$RW_{med.}(\alpha) = \frac{W_{med.}(\alpha)}{TW(\alpha)} \cdot 100 \quad (11)$$

Ezeknek a mennyiségeknek a felhasználásával lehet kifejezni a kopási egyensúlytalanságot (wear imbalance):

$$WIB(\alpha) = RW_{medial}(\alpha) - RW_{lateral}(\alpha) \quad (12)$$

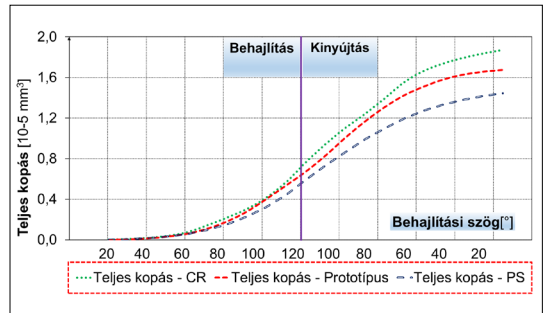
A kopási egyensúlytalanság százalékban mutatja meg, hogy mennyivel tér el a mediális oldali kopás a laterális oldali kopáshoz képest. Ez azt is jelenti, hogy ha egy protézis egyenletlen mediális terhelésnek (és kopásnak) van kitéve, akkor a fent említett protézis tibiális felületén egy úgynevezett öblösödés vagy vályúsodási (hollowing) mechanizmus indulhat el.

Hosszú távon az öblösödés vagy vályúsodás odáig vezethet, hogy a protézis fiziológiás tibio-femorális tengelye megbillen, és ez a kóros dőlés egy kopást indukáló tényezővé válik [21].

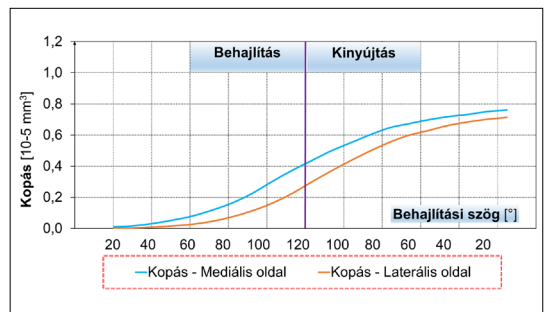
A bevezetett kopási tényezők után tekintsük át az eredményeket. Először meghatároztuk a teljes kopás nagyságát az összes protézisre vonatkozóan (5. ábra):

Majd külön-külön is meghatároztuk a laterális és mediális kopások nagyságát mindegyik protézisre (6., 7. és 8. ábra).

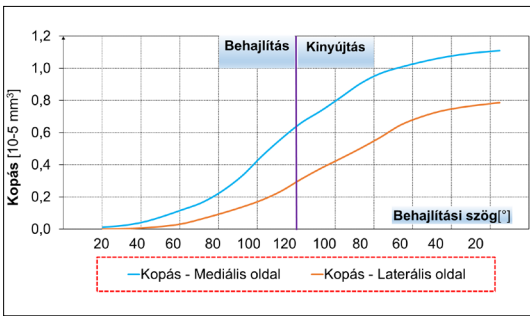
Végül, de nem utolsósorban ezen eredmények felhasználásával létrehoztuk a legfontosabb eredményt: a kopási egyensúlytalanság függvényét (9. ábra):



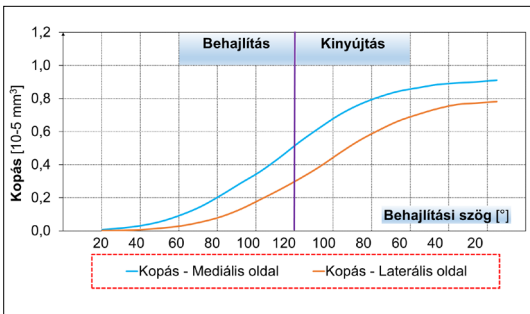
5. ábra. A teljes kopás nagysága



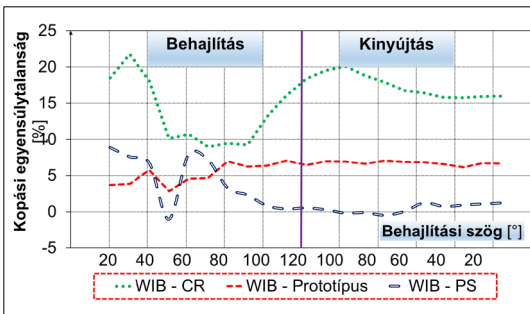
6. ábra. Laterális és mediális kopás (PS)



7. ábra. Laterális és mediális kopás (CR)



8. ábra. Laterális és mediális kopás (Prototípus)



9. ábra. Kopási egyensúlytalanság függvénye

4. Következtetések

A kopási eredmények egyértelműen rámutattak arra, hogy a PS (6. ábra) protézis esetén volt a legalacsonyabb mind a teljes kopás, mind a kopási egyensúlytalanság nagysága (átlagosan körülbelül 2,3%). Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a PS protézis esetén csekély eséllyel alakulhat ki öblösödés és abból következően tönkremenetel.

A CR típusú protézis esetén (7. ábra) a protézis ~23%-kal nagyobb kopást (TW) mutatott a PS típusúhoz képest. Ami még kevésbé kedvező, hogy az átlagos kopási egyensúlytalanság ~15,6% volt, ami a mediális oldalon súlyos kopáshoz és esetleg idő előtti tönkremenetelhez vezethet.

A vizsgálatokba bevontuk a néhai Krakovits Gábor professzor által tervezett prototípust is (7. ábra), amely a következő eredményeket hozta: ez a specifikus protézis mindössze 13,7%-kal több kopást produkált a referencia PS-hez képest, míg az átlagos kopási egyensúlytalanság mindössze 5,9% volt.

Fontos megjegyezni, hogy az ideális, kiegyensúlyozott kopáshoz a százalékos eltérés nem lenne szabad, hogy meghaladja mérnöki gyakorlatban általánosan elfogadott 5%-ot!

Mint látható, csak a PS protézis, illetve a prototípus protézis tudott ezen a határon belül vagy annak közelében elhelyezkedni.

Az eredmények alapján elmondható, hogy a CR típusú protézis geometriáját módosítani kell annak érdekében, hogy a mediális oldalán megengedtnél nagyobb kopás ne alakulhasson ki, amely idő előtti tönkremenetelhez vezethet.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-5 Új Nemzeti Kiválósági Programja a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap forrásaiból és az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíjából (BO/00047/21/6) valósult meg.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Karlhuber M.: *Development of a method for the analysis of the wear of retrieved polyethylene components of total knee arthroplasty*. Thesis, Technical University of Hamburg, Germany, 1995.
- [2] Kurtz S. M.: *UHMWPE Biomaterials handbook*. San Diego: Elsevier; 2009.
- [3] O'Brien S., Luo Y., Wu C., Petrak M., Bohm E., Brandt J. M.: *Computational development of polyethylene wear model for the articular backside surfaces in modular total knee replacements*. Tribology International, 59. (2013). 284–91. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.03.020>
- [4] Wimmer M. A., Andriacchi T. P.: *Tractive forces during rolling motion of the knee: Implications for wear in total knee replacement*. Journal of Biomechanics, 30. (1997) 131–137. [https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(96\)00112-1](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(96)00112-1)
- [5] Wimmer M. A., Andriacchi T. P., Natarajan R. N., Loos J., Karlhuber M., Petermann J., Schneider E., Rosenberg A. G.: *A striated pattern of wear in ultrahigh-molecular-weight polyethylene components of Miller-Galante total knee arthroplasty*. The Journal of Arthroplasty, 13. (1998) 8–16. [https://doi.org/10.1016/s0883-5403\(98\)90069-9](https://doi.org/10.1016/s0883-5403(98)90069-9)
- [6] Patten E. W., Van Citters D., Ries M. D., Pruitt L. A.: *Wear of UHMWPE from sliding, rolling, and rotation in a multidirectional tribo-system*. Wear, 304. (2013) 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.04.017>

- [7] Patten E. W., Van Citters D., Ries M. D., Pruitt L. A.: *Quantifying cross-shear under translation, rolling, and rotation, and its effect on UHMWPE wear*. *Wear*, 313. (2014) 125–134.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.03.001>
- [8] McGloughlin T., Kavanagh A.: *The influence of slip ratios in contemporary TKR on the wear of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE): An experimental view*. *Journal of Biomechanics*, 31. (1998) 8.
[https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(98\)80015-8](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(98)80015-8)
- [9] Hollman J. H., Deusinger R. H., Van Dillen L. R., Matava M. J.: *Knee joint movements in subjects without knee pathology and subjects with injured anterior cruciate ligaments*. *Physical Therapy*, 82. (2002) 960–972.
<https://doi.org/10.1093/ptj/82.10.960>
- [10] Nägerl H., Frosch K. H., Wachowski M. M., Dumont C., Abicht Ch., Adam P., Kubein-Meesenburg D.: *A novel total knee replacement by rolling articulating surfaces. In vivo functional measurements and tests*. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 10. (2008) 55–60.
- [11] Fekete G., Csizmadia B. M., Wahab M. A., De Baets P., Vanegas-Useche L. V., Biró I.: *Patellofemoral model of the knee joint under non-standard squatting*. *Dyna Colombia*, 81. (2014) 60–67.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v81n183.36171>
- [12] Mattei L., Di Puccio F., Ciulli E.: *A comparative study of wear laws for soft-on-hard hip implants using a mathematical wear model*. *Tribology International*, 63. (2013) 66–77.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.03.002>
- [13] Archard J. F., Hirst W.: *The wear of metals under unlubricated conditions*. *Proceedings of the Royal Society*, A 236. (1956) 397–410.
<https://doi.org/10.1098/rspa.1956.0144>
- [14] Hussin M. S., Fernandez J., Ramezani M., Kumar P., Kelly P. A.: *Analytical and computational sliding wear prediction in a novel knee implant: a case study*. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 23/4. (2020) 1–13.
<https://doi.org/10.1080/10255842.2019.1709118>
- [15] Innocenti B., Labey L., Kamali A., Pascale W., Pianigian S.: *Development and Validation of a Wear Model to Predict Polyethylene Wear in a Total Knee Arthroplasty: A Finite Element Analysis*. *Lubricants*, 2/4. (2014) 1–13.
<https://doi.org/10.3390/lubricants2040193>
- [16] Turell M., Wang A, Bellare A.: *Quantification of the effect of cross-path motion on the wear rate of ultra-high molecular weight polyethylene*. *Wear*, 255. (2003) 1034–1039.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00357-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00357-0)
- [17] O'Brien S. T., Bohm E. R., Petrak M. J., Wyss U. P., Brandt J-M.: *An energy dissipation and cross shear time dependent computational wear model for the analysis of polyethylene wear in total knee replacements*. *Journal of Biomechanics*, 47. (2014) 1127–1133.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.12.017>
- [18] Abdelgaied A., Liu F., Brockett C., Jennings L., Fisher J., Jin Z.: *Computational wear prediction of artificial knee joints based on a new wear law and formulation*. *Journal of Biomechanics*, 44. (2011) 1108–1116.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2011.01.027>
- [19] Fekete G.: *Computational study on lateral and medial wear characterization in knee implants by a multibody dynamic system*. *Acta Mechanica*, 232. (2021) 1075–1086.
<https://doi.org/10.1007/s00707-020-02868-4>
- [20] Fekete G., De Baets P., Wahab M. A., Csizmadia B. M., Katona G., Vanegas-Useche L. V., Solanilla J. A.: *Sliding-rolling ratio during deep squat with regard to different knee prostheses*. *Acta Polytechnica Hungarica*, 9. (2012) 5–24.
- [21] Wasielewski R. C., Galante J. O., Leighty R. M., Natarajan R. N., Rosenberg A. G.: *Wear patterns on retrieved polyethylene tibial inserts and their relationship to technical considerations during total knee arthroplasty*. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 299. (1994) 31–43.

Szállézerek sugármenetének elemzése a nyálábvezető optikai szál végétől a fókuszfoltig

Analysis of Fibre Laser's Optical Construction from the End of the Beam Guiding Optical Fibre to the Focal Spot

Meszlényi György,¹ Bitay Enikő²

¹ Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország, meszlényi.gyorgy@uni-obuda.hu

² Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, ebitay@ms.sapiientia.ro

Abstract

In material-processing fiber lasers, the resonator in the closed box produces the laser radiation. Even with the same resonator, the diameter of the laser beam transporting fiber optics and the properties of the optical elements in the laser focusing head decide the cross-section of the focused laser beam used for machining. If we summarize the formulas in different sources in the literature, we can predict the effect of each optical element: what will happen if we choose another focusing lens, put a beam expander in the system, set on the beam expander how many times the laser beam expands. The other important point is that if we want to repeat an experiment or start a production process based on a scientific publication, then in addition to the resonator, it would be good to know the data of the optical elements in the focusing head, which is usually incomplete in the presented articles, but we can determine them approximately using the four formulas listed in the article.

Keywords: *fibre laser, laser micromachining, focusing head.*

Összefoglalás

Anyagmegmunkáló szállézereknél a zárt dobozban lévő rezonátor állítja elő a lézersugárzást. Azonos rezonátor esetén is a nyálábtovábbító optikai szál átmérője és a fókuszálófejben lévő optikai elemek tulajdonságai döntik el, hogy milyen lesz a megmunkáláshoz felhasznált, fókuszált nyáláb keresztmetszete. Ha összegezzük a szakirodalomban, különböző forrásokban szereplő képleteket, akkor meg tudjuk jósolni az egyes optikai elemek hatását: pl. mi lesz, ha másik fókuszálólencsét választunk, beteszünk a rendszerbe egy nyálábtágítót, vagy a nyálábtágítón beállítjuk, hogy hányszorosára táguljon a lézernyaláb. A másik fontos szempont, hogy ha meg szeretnénk ismételni egy kísérletet vagy el szeretnénk indítani egy gyártási folyamatot egy tudományos publikáció alapján, akkor a rezonátoron kívül jó lenne a fókuszálófejben lévő optikai elemek adatait ismerni, ami általában hiányosan szerepel a bemutatott cikkekben, de a jelen cikkben ismertetett négy összefüggés segítségével közelítőleg meg tudjuk határozni őket.

Kulcsszavak: *szállézer, lézeres mikromegmunkálás, fókuszálófej.*

1. Bevezetés

Anyagmegmunkáló szállézereknél a zárt dobozban lévő rezonátor állítja elő a lézersugárzást, ahol lézerdiódák adják át az energiájukat a nyitó- és zárótükör funkcióját ellátó, Bragg-rácscsal felszerelt, gerjesztett optikai szálnak. Innen a nya-

lábtoábbító optikai szállal viszik el a sugárzást a fókuszálófejhez. Jelen cikkben a mikromegmunkálás terén alkalmazott szállézereket elemezzük.

A fókuszálófejben kilép a lézersugárzás a nyálábtovábbító optikai szálból, egy adott kúpszögön belül, amit az optikai szál numerikus apertúrája

jellemez. A nyalábtovábbító optikai szálból kilépő sugárzást párhuzamosítja a kollimátor lencse, ezt követheti opcionálisan egy nyalábtágító, majd a fókuszálólencse a munkadarabra fókuszálja a nyalábot, melynek relatív mozgása a munkadarabhoz képest elvégzi a kitervelt műveletet, mely lehet fúrás, vágás, hegesztés stb. A cikkben felhasznált mennyiségeket, jelöléseket és mértékegységüket az **1. táblázat** tartalmazza a mikromegmunkálásnál használatos mértékegységeket alkalmazva, bár a hullámhosszt nanométerben szokták megadni, az (1) és (2) képletben akkor adódik ki a mikrométer mértékegység, ha a hullámhosszt is mikrométerben helyettesítjük be.

Lézeres megmunkálásnál fontos szerep jut a megmunkáló lézernak, ezen belül a fókuszált nyaláb keresztmetszeti jellemzőjének, a fókuszfoltátmérőnek, mert a fókuszált nyaláb az az érintésmentesen dolgozó szerszám, mely energiaátadás útján a megmunkálást végzi. A fókuszfolt átmérőjének képletei több szakirodalomban megegyeznek, csak a közös formátum eléréséhez néhol meg kell duplázni a sugarat, hogy az átmérőt megkapjuk, és a nyalábminőségi adatokat át kell számítani: a K nyalábterjedési tényező reciprokát, az M^2 nyalábminőségi tényezőt beírva a képletbe (1) [1, 2].

$$d_{f0} = \frac{4\lambda M^2 f}{B_e d_b \pi} \tag{1}$$

Itt λ a lézersugárzás hullámhossza, f a lézernyalábot a munkadarabra fókuszáló lencse fókusz távolsága, M^2 a nyalábminőség tényező, mely megmondja, hogy az ideális Gauss-nyalábhoz képest hányszorosa a vizsgált nyaláb fókuszfoltátmérője, d_b a fókuszálólencse előtti, közel kollimált lézernyaláb átmérője. Ha a fókuszálólencsére eső, közel kollimált lézernyalábot tágítjuk, akkor az

1. táblázat. A cikkben használt mennyiségek jelei, megnevezései és mértékegységei

Jel	Megnevezés	Mértékegység
F	a fókuszálólencse fókusz távolsága	mm
f_{coll}	a kollimátor fókusz távolsága	mm
d_{fc}	a nyalábvezető optikai szálmagátmérője	μm
d_b	a párhuzamosított nyaláb átmérője	mm
d_{f0}	fókuszfoltátmérő	μm
λ	hullámhossz	μm
M^2	nyalábterjedési tényező	nincs
Z_R	Rayleigh-hossz	μm

alul szereplő d_b nyalábátmérő szorzódik a nyalábtágító szorzószámával, vagyis egy mértékegység nélküli számmal (B_e), ami megmondja, hogy hányszorosa lett a nyaláb átmérője a tágítatlanhoz képest [1]. A fókuszált lézernyaláb foltátmérőjének képletéből (1) következik, hogy minél kisebb az M^2 tényező értéke, annál kisebb területre fókuszálható a lézer energiája.

A Rayleigh-hossz a nyalábterjedés irányában a fókuszsíktól mért azon hossz, amely végén a lézerfolt területe duplájára, így a nyaláb rádiusza gyök kettő-szeresére nő, ezért a felületegységre jutó impulzusenergia a felére esik vissza a fókuszfoltban számíthatóhoz képest. Általában a Rayleigh-hossz kétszeresén belül tekintik fókuszban levőnek a nyalábot. Képlete nagyon hasonló a lézerfoltátmérő képletéhez, csak itt a fókuszálólencse fókusz távolsága és a lencse előtti nyalábátmérő a négyzetben szerepel (2) [1].

$$Z_R = \frac{4\lambda M^2 f^2}{B_e^2 d_b^2 \pi} \tag{2}$$

Ami még indokolja ezt az elemzést, az, hogy a lézeres megmunkáláskor a nyaláb fókuszfolt közeli részét használjuk, érdekes, hogy hol van a fókusz, mekkora a fókuszfoltátmérője és a kétszeres Rayleigh-hossz, amin belül lehet dolgozni a lézernel. Milyen további előnyökkel jár a két fenti mennyiség vizsgálata? E két változó alapján függvényekkel leírható a fókuszált nyaláb geometriája: a nyalábátmérő a nyalábterjedés irányába mutató z-koordináta függvényében, ahol z_0 a fókusz sík z-koordinátája: [1].

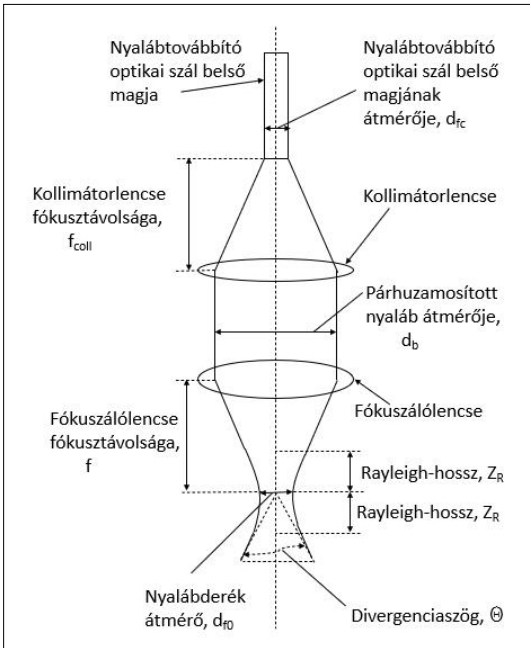
A szakirodalomban található még egy képlet szállézerek fókuszfoltátmérőjének megadására, melyben f a lézernyalábot a munkadarabra fókuszáló lencse fókusz távolsága, d_{fc} a lézertovábbító optikai szál magátmérője, f_{coll} a lézersugarat párhuzamosító kollimátor fókusz távolsága (3) [3, 4]. Ezt a képletet mindkét hivatkozott irodalom közelítő képletnek nevezi, ezért az ennek alapján kiszámolt értékeket két értékes jegyre adjuk meg. Egy másik cikkben a képlet a nyalábtágító szorzószámával, vagyis egy mértékegység nélküli számmal (B_e) bővül (4) [5].

$$d_{f0} = \frac{d_{fc} f}{f_{coll}} \tag{3}$$

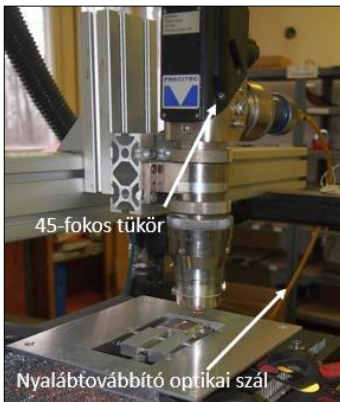
$$d_{f0} = \frac{d_{fc} f}{f_{coll} B_e} \tag{4}$$

2. Elemzés

Az eddig tárgyalt optikai elemeket és a lézerfej sugármenetét az **1. ábra** mutatja, magát a lé-



1. ábra. A fókuszált lézernyaláb eddig tárgyalt jellemzőinek szemléltetése



2. ábra. A lézerberendezéshez tartozó fókuszálófej

zerfejet a 2. ábra, melyen látható a sárga színű védőburkolattal ellátott nyalábtovábbító optikai szál és a fókuszálófej egy 45 fokos tükörrel, mely 90 fokkal eltéríti a nyalábot függőleges irányba.

Azonos rezonátor esetén is a nyalábtovábbító szaloptika átmérője és a fókuszálófejben lévő optikai elemek tulajdonságai döntik el, hogy milyen lesz a megmunkáláshoz felhasznált, fókuszált nyaláb keresztmetszete. Ha összegezzük a szakirodalomban különböző forrásokban szereplő képleteket (1), (2), (3), (4), akkor meg tudjuk határozni az egyes optikai elemek hatását: mi lesz, ha másik fókuszálólencsét választunk, beteszünk

a rendszerbe egy nyalábtágítót, a nyalábtágító beállítását módosítjuk. Ezekre a változtatásokra szükség lehet, ha jelentősen változnak a megmunkálási feladatok: a lézersugárzás változatlan hullámhosszán jelentősen eltérő elnyelési tényezőjű anyagot, más anyagvastagságot vagy más felületi kiképzésű munkadarabot kell megmunkálni. A fókuszálóolencse cseréjét vagy nyalábtágító rendszer beépítését egy kísérleti lézer elrendezésben meg lehet tenni, de egy adott gyártó által szállított rendszer esetén a gyártótól kell megrendelni az átalakítást, a lézerbiztonsági szempontokat is figyelembe véve.

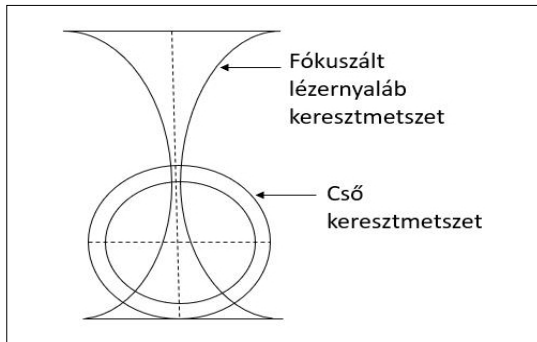
A másik fontos szempont, hogy ha meg szeretnénk ismételni egy kísérletet vagy el szeretnénk indítani egy gyártási folyamatot egy tudományos publikáció alapján, akkor a rezonátoron kívül jó lenne a fókuszálófejben lévő optikai elemek adatait ismerni, amelyek általában hiányosan szerepelnek a bemutatott cikkekben, de az előbb felsorolt négy képlet segítségével közelítőleg meg tudjuk határozni őket. A lézeres megmunkálást bemutató cikkeknel általában nem adják meg a fókuszálófejben lévő lencsék görbületeit, törésmutatóit, így az optikai tervezésben használt sugáratvezető szoftverekkel nem lehet számításokat végezni a bemenő adatok hiányában.

Az (1) képletet elemezve, ha a fókuszálóolencse fókuszátvolságát csökkentjük, akkor elvben a foltméret lineárisan csökken, és a (2) képletből következik, hogy a Rayleigh-hossz négyzetesen csökken. Az (1) képletet elemezve, ha a lézernyalábot x -szeresére tágítjuk, akkor elvben a foltméret $1/x$ függvény szerint csökken, és a (2) képletből következik, hogy a Rayleigh-hossz $1/x^2$ függvény szerint csökken. Azért elvben, mert rövidebb fókuszú fókuszálóolencsét használva nő a szférikus aberráció, romlik a nyalábtérjedési tényező, tehát d_{f0} és Z_R nem annyira erősen csökken, ugyanez történik a nyalábtágító beépítése esetén is, ezeket Harp cikke [2] elemzi.

Hol van ezeknek a tényezőknek a szerepe? Minél kisebb a foltméret, annál koncentráltabb az energia, így nagyobb megmunkálási sebességet lehet elérni, de mivel kisebb a Rayleigh-hossz, ezért csak vékonyabb anyagokat lehet megmunkálni. Ha csövek vágásáról van szó, melynek egyik alkalmazása a korszorúér-tágító sztentek vágása, akkor úgyszólván a falvastagság, tehát használhatunk kis foltméretet, és ebben az esetben a kis Rayleigh-hossznak az lesz az előnye, hogy a megmunkálással ellentétes csőoldalon defókuszba kerül a lézer, tehát szétterül, s így nem lesz vagy kevéssé lesz hő okozta átalakulás a cső

szemközti falában (3. ábra).

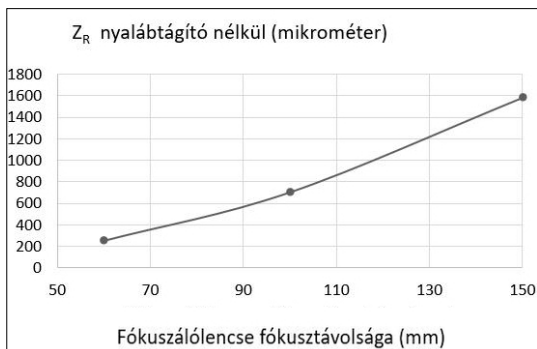
Azonos rezonátor esetén a különböző lencsék cserélgetésének hatását jól bemutatja Harp cikke [2]. Harp IPG gyártmányú, 300 W-os, folyamatos üzemű, ytterbium szállézer rezonátorát használja, először nyalábtágító nélkül cserélgeti a fókuszáló lencsét – rendre 60, 100, 150 mm fókuszút kipróbálva –, így a fókuszált lézernyaláb foltmérete 18,9 mikrométertől (60 mm-es fókuszáló lencsénél) 48,7 mikrométerig (150 mm-es fókuszá-



3. ábra. Fókuszált lézernyaláb hosszmetesze cső végénél

2. táblázat. Harp cikkében megadott adatok és az általunk kiszámolt eredmények

f (mm)	d_{f0} (mm)	B_e	Z_R (mm)	M^2
60	18,99	1	253,19	1,04
100	31,65	1	703,31	1,04
150	47,47	1	1582,45	1,04
60	11,08	4	36,93	2,43
100	9,36	5	41,60	1,54
150	11,50	5	76,67	1,26



4. ábra. A Rayleigh-hossz változása a fókuszáló lencse fókusz távolságának függvényében nyalábtágító nélkül

lólencsénél) változik. Kiszámoltuk a Rayleigh-hosszokat: ezek 253 mikrométertől (60 mm-es fókuszáló lencsénél) 1582 mikrométerig (150 mm-es fókuszáló lencsénél) változnak (4. ábra). A nyalábtovábbító szaloptika átmérője 9 mikrométer volt, a lézersugárzás hullámhossza pedig 1075 nm, amit mikrométerben érdemes a képletekbe helyettesíteni. A fókuszált nyalábkéretmeteszet adatait a kiszámolt Rayleigh-hosszokkal a 2. táblázat, a kísérlet és a lézerberendezés adatait pedig a 3. táblázat tartalmazza.

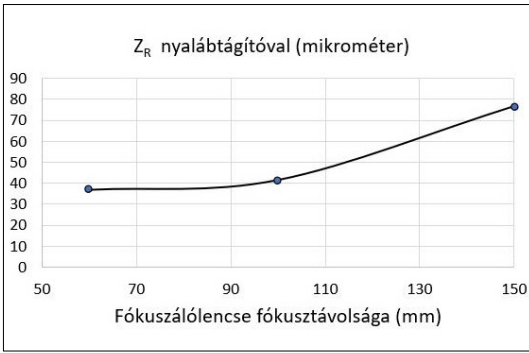
A cikkben még jelentősebb a fókuszált lézernyaláb paramétereinek változása egy ötszörös nyalábtágító behelyezése esetén. Így a fókuszált lézernyaláb foltmérete 9,36 mikrométertől (100 mm-es fókuszáló lencsénél) 11,5 mikrométerig (150 mm-es fókuszáló lencsénél) változik. Tehát kb. feleakkora a fókusz foltméret nyalábtágítóval, mint nyalábtágító nélkül legkisebb elérhető értéként. Meg kell jegyezni, hogy a 60 mm-es fókuszáló lencsénél csak 4-szeres nyalábtágítást tett lehetővé a lencse szabad keresztmetsze. Kiszámoltuk a Rayleigh-hosszokat: ezek 36,9 mikrométertől (60 mm-es fókuszáló lencsénél) 76,7 μ m-ig (150 mm-es fókuszáló lencsénél) változnak (5. ábra). Tehát akár hatodakörára le lehet csökkenteni a Rayleigh-hossz nyalábtágítóval, mint a nélkül.

A kollimátor lencse fókusz távolságát, mely hiányzó adat a cikkből, a (4) képletet f_{coll} -ra rendezve (8) 28,4 mm-re jött ki minden optikai elem esetén, amit a cikkben kipróbáltak.

Harp cikkének [2] különlegessége, hogy a lézer elé ferdén elhelyezett Al-7075 T6 anyagon hegeszt

3. táblázat. A kísérlet és a lézerberendezés egyéb adatai

Paraméter	Érték
d_{fc} (mm)	9
l (mm)	1,075
d_b (mm) Tágítatlan nyalábtátmérő	4,5
Lézerberendezés-gyártó	IPG
Lézerberendezés típusa	300 W, CW, ytterbium szállézer
Megmunkált anyag	Al-7075 T6
Vastagság, geometria	Lemez tetején varratok
Cél	Fókusz közeli Lézernyaláb-kéretmeteszet meghatározása
Művelet	Hegesztés



5. ábra. A Rayleigh-hossz változása a fókuszálólencse fókusz távolságának függvényében nyalábtágítóval

tési varratsorozattal határozta meg a fókuszolt átmérőjét és a nyalábterjedési tényezőt a lézerfejben lévő optikai elemek cserélgetése során.

Baumeister 2006 cikkében [6] a következő adatokat találjuk: a fókuszoltátmérő 20 μm , a lézersugárzás hullámhossza 1090 nm, a nyalábminőség tényező 1,1, a fókuszálólencse előtti párhuzamos nyaláb átmérője 5 mm, nyalábtágító nem volt, ezért B_e értéke 1. Ennek alapján az (1) képletet a fókuszálólencse fókusz távolságára rendezve (5):

$$f = \frac{d_{f0} B_e d_b \pi}{4 \lambda M^2} \quad (5)$$

$f = 65,5$ mm adódik. Vegyük észre, hogy a fókuszoltátmérő (1) képletét csak $f/(B_e d_b)$ -el kell szorozni, hogy megkapjuk a (2) képletből a Rayleigh-hosszat, tehát (6):

$$Z_R = \frac{f}{B_e d_b} \quad (6)$$

Így Z_R 262 mikrométernek jön ki. Mivel csak egy szálátmérő van megadva, mely valószínűleg a rezonátor optikai szál átmérője, ezért a kollimátor fókusz távolsága nem számítható ki. A megadott és kiszámolt adatokat a 4. táblázat 2. oszlopa tartalmazza, melyben a kiszámolt értékeket sötét háttérrel tüntettük fel. A lézer és a megmunkálás adatait a 5. táblázat 2. oszlopa tartalmazza.

Sobih [7] cikkében a fókuszoltátmérő 73 μm , a fókuszálólencse fókusz távolsága $f = 190,5$ mm, a lézersugárzás hullámhossza 1090,5 nm, a nyalábminőség tényező 1,1, nyalábtágító nem volt, ezért B_e értéke 1. Ennek alapján az (1) képletből adódik a fókuszálólencse előtti párhuzamos nyaláb átmérője (7):

$$d_b = \frac{4 \lambda M^2 f}{B_e d_{f0} \pi}, \quad (7)$$

amely 3,9 mm, majd ennek felhasználásával a (6) képletből a Rayleigh-hossz közelítőleg

4. táblázat. A szállérezek adatai, kiszámított értékek sötét cellákban

Cikk	Baumeister 2006 [6]	Sobih 2007 [7]	Guerra 2019 [8]	Meszlényi 2019 [9]
d_{f0} (mm)	20	73	150	14
d_{fc} (mm)	n.a.	14	150	50
f (mm)	65,5	190,5	50	50
f_{coll} (mm)	n.a.	36	50	50
l (mm)	1,09	1,07	1,08	1,07
M^2	1,1	1,1	1,1	1,1
d_b (mm)	5	3,9	0,5	5,4
Z_R (mm)	262	3554	14867	131

5. táblázat. A vizsgált lézerek és a megmunkálás adatai

Cikk	Baumeister 2006 [6]	Sobih 2007 [7]
Lézerberendezésgyártó	SPI	IPG
Lézerberendezéstípus (mindegyik szállézer)	SP-100 C egymódusú 100 W	YLR- 1000-SM ytterbium 1 kW egymódusú
Megmunkált anyag	1.4301	EN 43 lágyított acél
Vastagság, geometria	100–300 μm fólia	1 mm-es lemez
Művelet	Fóliavágás	Lemezvágas
Cél	Kis vágási rés: 20 μm elérése	Bordázottságmentes vágási élt ért el

6. táblázat. A vizsgált lézerek és a megmunkálás adatai

Cikk	Guerra 2019 [8]	Meszlényi 2019 [9]
Lézerberendezésgyártó	Rofin	IPG
Lézerberendezéstípus (mindegyik szállézer)	FL x50s	YLR-150/1500-QCW-AC-Y11
Megmunkált anyag	316 rozsdamentes acél	Réz- és ezüsfólia
Vastagság, geometria	cső	50 μm rézfólia, 150 μm ezüsfólia
Művelet	Vágás	Fúrás
Cél	Szentvágás	Erősen reflektáló anyagok fűrésésének vizsgálata

3,5 mm-re adódik. Mivel adott a lézertovábbító optikai szál magátmérője is, mely 14 mm, a (3) képletből a kollimátor lencse fókusz távolsága számolható ki (8), 36 mm-re jön ki.

$$f_{coll} = \frac{d_{fc} f}{d_{f0}} \quad (8)$$

A megadott és kiszámolt adatokat a **4. táblázat** 3. oszlopa tartalmazza, melyben a kiszámolt értékeket sötét háttérrel tüntettük fel. A lézer és a megmunkálás adatait az **5. táblázat** 3. oszlopa tartalmazza.

Guerra [8] cikkében adott a nyalábvezető optikai szál átmérője: 150 mikrométer és a kollimátor lencse fókusz távolsága, mely 50 mm, valamint a fókuszáló lencse fókusz távolsága, mely 50 mm, így a (3) képletből a fókuszfoltátmérő 150 mikrométerre adódik. Ennek és a **4. táblázat**ban adott hullámhossz és nyalábminőségi tényező alapján a (6) képletből a Rayleigh-hossz számolható ki, mely közelítőleg 15 mm-re adódik (nyalábtágító nem volt, ezért B_e értéke 1). Az eddig megadott adatokból, a (7) képletből adódik a fókuszáló lencse előtti párhuzamos nyaláb átmérője, mely 0,5 mm. A megadott és kiszámolt adatokat a **4. táblázat** 4. oszlopa tartalmazza, melyben a kiszámolt értékeket sötét háttérrel tüntettük fel. A lézer és a megmunkálás adatait a **6. táblázat** 2. oszlopa tartalmazza.

Meszlényi [9] cikkében a lézervezető optikai szálátmérője: 14 μm , a kilépő nyalábot tágító és párhuzamosító kollimátor lencse fókusz távolsága: 50 mm. A párhuzamos lézernyalábot a munkadarabra fókuszáló lencse fókusz távolsága: 50 mm (f). A nyalábtágító állása 1-es volt, így a nyalábtágítási faktor (B_e) szorzótényezője 1, így a (4) képletből a fókuszfoltátmérő 14 mikrométerre adódik. Ennek és a **4. táblázat**ban adott hullámhossz és nyalábminőségi tényező alapján a (7) képletből a fókuszáló lencse előtti nyalábátmérő 5,4 mm-re adódik. Végül a (6) képletből a Rayleigh-hossz számolható ki, mely közelítőleg 131 μm -re adódik. A megadott és kiszámolt adatokat a **4. táblázat** 5. oszlopa tartalmazza, melyben a kiszámolt értékeket sötét háttérrel tüntettük fel. A lézer és a megmunkálás adatait a **6. táblázat** 3. oszlopa tartalmazza.

Az összes elemzett cikknél a megmunkált anyagvastagság a fókusz mélységen belül volt, tehát a kétszeres Rayleigh-hosszon belül helyezkedett el.

3. Következtetések

Cikkünkben bemutattuk az anyagmegmunkáló szállérezek tudományos publikációkban hiányzó

adatainak meghatározási módszerét, mely a szakirodalomban különböző helyeken megtalálható képletek együttes alkalmazásával történik. Ezek az adatok a nyalábvezető optikai szál kimenetétől a fókuszfoltig meghatározzák a nyalábformáló optikai rendszert, mely a megmunkálófejben van elhelyezve, és a **4. táblázat**ban szereplő 8 adatból maximum 3 hiányzó adat kiszámítását teszi lehetővé.

Munkánkban az egyes cikkekből különböző mintázat szerint hiányzó tényezők – ilyen a fókuszáló lencse fókusz távolsága, a kollimátor fókusz távolsága, a párhuzamosított nyaláb átmérője, a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz kiszámolása – vált lehetővé. Elemeztük a megmunkálófejben elhelyezkedő optikai elemek tulajdonságváltozásainak hatását a fókuszfoltátmérőre és a Rayleigh-hosszra.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kaplan A. F.: *Theoretical Analysis of Laser Beam Cutting*. Shaker Ver. Aachen, 2002.
- [2] Harp W. R., Paleocrassas A. G., Tu J. F.: *A Practical method for determining the beam profile near the focal spot*. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 37/11–12. (2008) 1113–1119.
<https://doi.org/10.1007/s00170-007-1067-z>
- [3] Formulary. (accessed on Aug. 11, 2022).
<https://www.silloptics.de/en/service/sill-technical-guide/laser-optics/formelsammlung>
- [4] VanGemert R., Schoenly J., Sarrafi R., Mendes M.: *Fiber laser micromachining in high-volume manufacturing*. Industrial Laser Solutions, May, 2015.
- [5] Tu J. F., Paleocrassas A. G.: *3 Low speed laser welding of aluminium alloys using single-mode fiber lasers*. In: (szerk.: Xiaodong Na, Stone) *Laser Welding*, Ed. Rijeka, Croatia: SCIYO, 2010. 47–106.
<https://doi.org/10.5772/9857>
- [6] Baumeister M., Dickmann K., Hoult T.: *Fiber laser micro-cutting of stainless steel sheets*. Applied Physics A volume 85/2. (2006) 121–124.
<https://doi.org/10.1007/s00339-006-3687-9>
- [7] Sobih M., Crouse P. L., Li L.: *Striation-free fibre laser cutting of mild steel sheets*. Applied Physics A 90/1. (2008) 171–174.
<https://doi.org/10.1007/s00339-007-4247-7>
- [8] Guerra A. J., Ciurana J.: *Minimum Quantity Lubrication in Fibre Laser Processing For Permanent Stents Manufacturing*. Procedia Manufacturing, 41. (2020) 492–499.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.036>
- [9] Meszlényi G., Bitay E.: *The Role of Focus Position in Single Pulse Laser Drilling of Highly Reflecting Materials*. Acta Materialia Transylvanica, 2/1. (2019) 61–68.
<https://doi.org/10.33924/amt-2019-01-10>

Mesterséges neurális hálózatok alkalmazása adszorpció vizsgálatokban. Esettanulmány

Application of Artificial Neural Networks in Adsorption Studies. A case study

Mihály Norbert-Botond,¹ Csavdári Alexandra²

Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Kémia és Vegyészmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia,

¹ norbert.mihaly@ubbcluj.ro

² alexandra.csavdari@ubbcluj.ro

Abstract

The work focuses on the development of an artificial neural network (ANN) based model that can describe the adsorption of benzalkonium chloride from aqueous solutions onto commercially available kitchen paper. Various ANN architectures were tested in order to find the most suitable one in terms of overlapping between calculated and measured output data (coefficient of determination and mean absolute percentage error), as well as correctly interpolating outputs when using inputs from inside the experimental training range. The networks all had 4 inputs and 1 output, as well as a single hidden layer. Optimal ANN design was sought by varying both the number of neurons in the hidden layer and the type of transfer function towards it. The best find was employed in assessing the relative importance of input parameter values in the output, as well as the model's suitability for predictions outside the training range.

Keywords: *benzalkonium chloride, adsorption, modelling, artificial neural networks.*

Összefoglalás

Jelen tanulmány egy mesterséges neurális hálózaton (MNH) alapuló modell kifejlesztésére összpontosít, amely leírja a benzalkónium-klorid vizes oldatokból a kereskedelemben kapható konyhai papírra való adszorpcióját. Különböző MNH-architektúrákat teszteltünk annak érdekében, hogy megtaláljuk a legmegfelelőbbet a számított és mért kimeneti adatok (meghatározási együttható és átlagos abszolút százalékos hiba) átfedése, valamint a kísérleti betanítási tartományon belüli bemenetek használatakor a kimenetek helyes interpolálása szempontjából. Az összes kipróbált hálózatnak 4 bemenete és 1 kimenete, valamint egyetlen rejtett rétege volt. Az optimális MNH-szerkezetet kerestük a rejtett rétegben lévő neuronok számának és a felé irányuló átviteli függvény típusának változtatásával. A legjobb eredményű hálózatot a bemeneti paraméterértékek relatív fontosságának értékelésére használtuk a kimeneti paraméterben, valamint a modell alkalmasságát teszteltük a képzési tartományon kívüli előrejelzésekre.

Kulcsszavak: *benzalkónium-klorid, adszorpció, modellezés, mesterséges neurális hálózatok.*

1. Bevezetés

A közelmúltbeli járvány miatt a figyelem a fertőtlenítő hatóanyagok tanulmányozására terelődött. Antibakteriális hatása miatt a benzalkóni-

um-kloridot (BAK) tartalmazó kézfertőtlenítő szereket javasolta a Centers for Disease Control and Prevention (CDC) és a WHO (World Health Organization (WHO) az alkoholalapú termékek alternatívájaként [1–3].

A BAK-termékek intenzív használata kockázatos, például a különböző környezetekben való felhalmozódása károsíthatja ezeket. A BAK nagy koncentrációja hatással van a vízi ökoszisztémákra a halak endokrin zavara miatt, míg a hosszú távú következmények még további kutatások tárgyát képezik [4]. A BAK a talajban is befolyásolja a mikroorganizmusok aktivitását, így azok nitrógénátalakító képességét [5], míg növényekben tápanyaghiányt idézhet elő [6]. Bár a BAK-koncentráció szintje szabályozott, ez a vegyi anyag továbbra is aggályokat vet fel, mivel csak korlátozott ismeretekkel rendelkezünk hosszú távú hatásairól [7].

Az adszorpciót általában a szennyező anyagok vizes oldatokból történő eltávolítására használják. Adsorbensekről, például természetes anya-gokról [8, 9] és polietilén mikroműanyagokról [10] számoltak be. A jelenlegi tanulmány egy általános háztartási cikket (papírt) alkalmaz módosíthatlan adszorbens anyagként.

Az adszorpció folyamat összetettsége és több tényezőtől való függése, mint például: az adszorbens típusa, a hőmérséklet, a keverési sebesség, az adszorbeált fajták és az adszorbens tömegaránya modellezését kihívást jelentő feladattá változtatja. A folyamatok hagyományos matematikai leírásának alternatívája az adatvezérelt modellek, például a mesterséges neurális hálózatok (MNH) használata. A metilénkék [11], valamint a naplentesárga [12] esetében az adszorpció modellezésében sikeres alkalmazásukról számoltak be. Mindkét esetben a MNH-modellek pontos előrejelzéseket nyújtottak, ezek a kísérleti adatpontok között voltak találhatóak. Más tanulmányok hálózatokat használtak vagy ciklikus adszorpció folyamatok tervezésére és optimalizálására [13], vagy különböző ionok adszorpciója termodinamikai paramétereinek meghatározására [14].

A jelen tanulmány célja a BAK törlőpapíron való adszorpciójának modellezése, így a vizes oldatokból való eltávolításának leírása megfelelő MNH kifejlesztésével. A szerzők legjobb tudomása szerint ezt a fajta modellezést még nem alkalmazták sem a BAK-adszorpcióra, sem egy ilyen könnyen hozzáférhető adszorbens anyag használatára. A MNH-hálózat használatának előnyei: elősegítheti a BAK eltávolításának optimalizálását adszorpció segítségével, tovább használható előrejelzésre, illetve a mögöttes folyamatok jobb megértését eredményezheti.

2. Anyagok és eljárások

2.1. Kísérleti adatbázis

A MNH kifejlesztéséhez használt kísérleti adatokat a BAK kereskedelmi papírtörlőkön történő laboratóriumi méretű adszorpciója során gyűjtötték be. A vizes BAK és papír keverékek abszorbanciáját 262 nm-en mérték, így 0,162 és 1,164 közötti értékeket kaptak. A kísérletek különböző hőmérsékleteken (18–45 °C), a vizes oldat kezdeti BAK-koncentrációja (0,25–1,00 g/L) és a tömegarány értéke (25–100 mg/g) változtatásával készültek.

2.2. Mesterséges neurális hálózatok

Ennek a konkrét adszorpció folyamatnak a modellezéséhez egy előreccsatolt mesterséges neurális hálózati architektúrát vettünk figyelembe. Többretegű perceptron (MLP) néven is ismert. A bemeneti adatokat a teljes folyadék-szilárd anyag érintkezési idő, hőmérséklet, kezdeti BAK-koncentráció és tömegarány kísérleti értékei szolgáltatták, míg a modell kimenete a kísérleti abszorbancia értékének felelt meg. A pontos modell kidolgozása érdekében az MLP optimális architektúráját a rejtett rétegben lévő neuronok számának, valamint a rejtett rétegbe való átviteli függvény típusának változtatásával kerestük. Az első 5 és 15 között változott. Az utóbbi vagy logaritmus szigmoid függvény (*logsig*), vagy tangens szigmoid függvény (*tansig*). A kimeneti réteg felé irányuló átviteli funkciók mindig lineáris (*purelin*) típusúak voltak.

A hálózatokat a Levenberg–Marquardt-féle tanító algoritmus segítségével tanítottuk be. Az adatbázist a következőképpen osztottuk fel: 60% képzési célra, 20% és 20% validálásra és tesztelésre. A neuronszámok és az átviteli függvények összes kombinációját kidolgoztuk, és a modelleket két kritérium alapján értékeltük: az egyenlet által leírt determinációs együttható R^2 értéke (1) és az átlagos abszolút százalékos hiba $MAPE$ (2) értéke alapján.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|y_i - x_i|}{y_i}}{N} \cdot 100 \quad (2)$$

N az adatpontok száma, y_i a kívánt kimenet az i adatpontban, x_i a MNH-modell kimenete (előrejelzés) az i adatpontban, és \bar{y} az (y_i) értékek átlaga (y_i és x_i nem normalizált értékek).

Azokat a modelleket, amelyeknél az R^2 az 1-hez közelít és a $MAPE$ -értéke kisebb 3-nál, megfelelő pontosságúnak tartottuk további alkalmazásokhoz.

3. Eredmények és ezek kiértékelése

3.1. A MNH-modell kifejlesztése

Az összesen 297 adatpontból 177-et képzésre, 60-at validálásra, 60-at pedig tesztelésre használtunk. Az egyes architektúrák betanítását 5-ször megismételtük, hogy csökkentsük a hálózati súlyok véletlenszerű inicializálásának hatását. Az említett kritériumok értékeit a tesztelési adatkészleten az **1. táblázat** mutatja be az öt ismétlés közül a legjobb hálózatra. Itt logsig átviteli függvényt használunk. A **2. táblázat** ugyanazokat az információkat tartalmazza, de a *tansig* átviteli függvényt alkalmazó hálózatokra vonatkozóan.

A legjobbnak ítélt eredményeket kiemeltük a táblázatokban. Minden modell jó és némileg összehasonlítható R^2 értékeket mutat, míg a 9 neuronból álló *logsig* architektúra (**1. táblázat**)

1. táblázat. A *logsig* függvényt alkalmazó MNH-modellek értékelési kritériumai

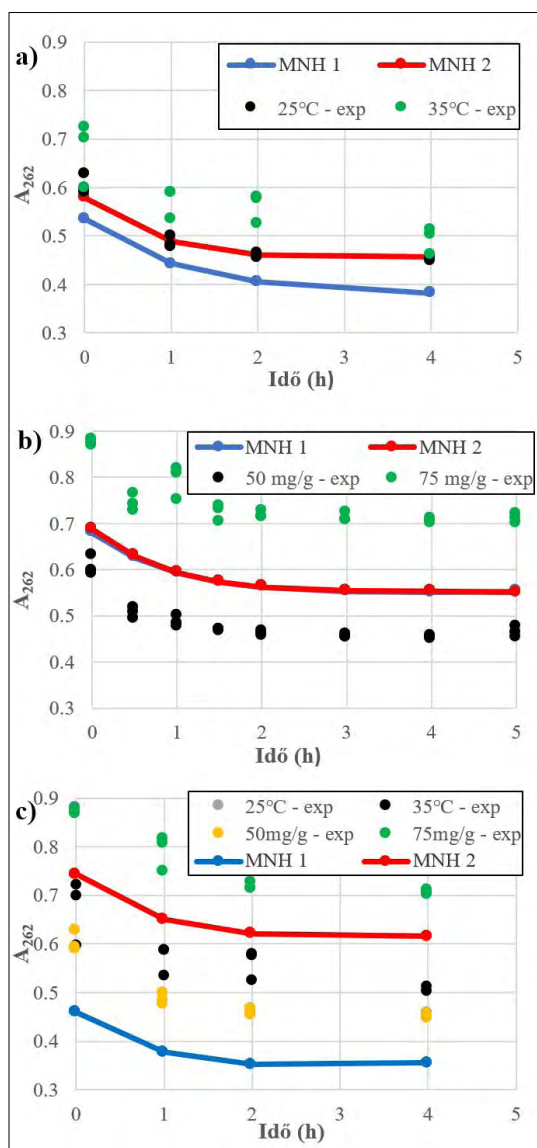
Rejtett neuronok	MAPE	R^2
5	3,40	0,991
6	3,24	0,993
7	4,03	0,988
8	3,32	0,991
9	2,82	0,994
10	4,08	0,990
11	3,79	0,989
12	4,50	0,985
13	4,65	0,980
14	3,74	0,987
15	5,04	0,983

2. táblázat. A *tansig* függvényt alkalmazó MNH-modellek értékelési kritériumai

Rejtett neuronok	MAPE	R^2
5	3,81	0,987
6	3,72	0,992
7	3,66	0,987
8	3,82	0,987
9	3,28	0,995
10	3,00	0,990
11	5,29	0,976
12	3,58	0,991
13	3,12	0,993
14	3,42	0,990
15	3,08	0,987

és egy 10 rejtett neuront használó *tansig* architektúra (**2. táblázat**) eredményezte a legalacsonyabb MAPE-értékeket.

Annak érdekében, hogy meghatározzuk, melyik modell használható további szimulációkhoz, a két kidolgozott MNH interpolációs képességét teszteltük. A *logsig* átviteli függvényt tartalmazó modellt MNH 1-nek, míg a *tansig* átviteli függvényt MNH 2-nek nevezzük.



1. ábra. A két MNH-modell interpolációs eredményei: a) hőmérséklet-interpoláció; b) BAK/adszorbens tömegarány-interpoláció; c) mind a hőmérséklet, mind a BAK/adszorbens tömegarány-interpolációja

Az **1a)–1c) ábrák** az interpoláció eredményeit szemléltetik. A kísérleti adatokat szórásorokként, míg a MNH interpolált sorozatokat vonalakkal összekapcsolt szórásipontokként ábrázoltuk. Ez utóbbi két kísérleti bemeneti adat átlagával számított kimeneti adatnak felel meg. Fontos megemlíteni, hogy csak az interpolációra szánt paramétereket változtattuk a bemenetnél.

Megfigyelhető, hogy a MNH 2 jobb teljesítményt mutat az a) esetben a hőmérsékleti interpolációnál, valamint a c) esetben, amikor mind a hőmérséklet, mind a tömegarány interpolációját tanulmányoztuk. A MNH 1 mindkét esetben alulbecsüli az abszorbanciaértékeket, tehát nem teljesít megfelelően. Emiatt a további alkalmazásokhoz az ANN 2-t választottuk.

3.2. A MNH-modell felhasználása

A MNH 2 architektúrájának és interpolációs kapacitásának megfelelő modellt használtuk a bemeneti paraméterek relatív súlyának (jelentőségének) vizsgálatára annak kimeneti értékében, valamint a modell előrejelző képességének tesztelésére a betanítási (kísérleti) adatok tartományán kívül.

3.2.1. A bemeneti adatok relatív jelentősége

A bemeneti változók relatív súlyát (jelentőségét) Gevrey és munkatársai által leírt módszerrel számítottuk ki [15]. Ez az eljárás a MNH-modell kapcsolati súlyait használja. A kapott eredményeket a **3. táblázat** tartalmazza.

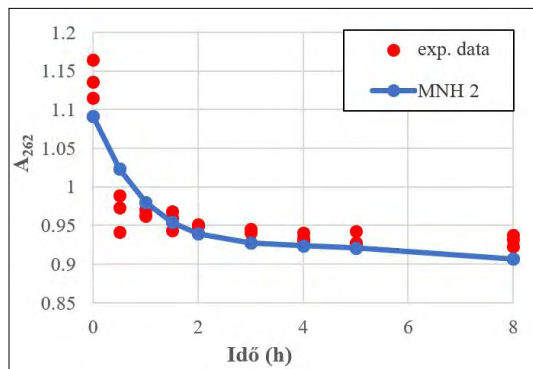
Az eredmények azt mutatják, hogy a folyadék és az adszorbens közötti teljes érintkezési idő a legbefolyásosabb paraméter a vizsgált folyamatra, a vártak megfelelően. A második legerősebb kimenet befolyásoló változó a BAK és az adszorbens tömegaránya. Tehát a tömegarány változtatása jobban befolyásolja ezt az adszorpció folyamatot, mint a vizes oldat kezdeti BAK-koncentrációjának változtatása. Mindeközben a hőmérséklet bizonyult a legkevésbé befolyásolónak.

3.2.2. Előrejelzési képesség a tanítási adatok tartományán kívül

A MNH 2 modellt használták a kimeneti adatok előrejelzésére, amikor olyan bemenetekkel táplálták, amelyek meghaladták az egyik paraméter kísérleti tartományát (az értékek a betanítási adatok tartományán kívül helyezkednek el). A cél annak tesztelése volt, hogy az előrejelzés megbízható-e, és a kidolgozott modell továbbra is alkalmas a 120 mg/g BAK és adszorbens tömegarányára. A szimulált eredményeket összehasonlítottuk

3. táblázat. A bemeneti paraméterek relatív jelentősége a modell kimeneti értékében

Modell	Idő (h)	Hőmérséklet (°C)	Kezdeti BAK-koncentráció (g/L)	BAK/adszorbens tömegarány (mg/g)
MNH 2	34,0 %	15,7 %	22,9 %	27,4 %



2. ábra. Az előre jelzett 120 mg/g tömegarány (MNH 2) idősorozata a 100 mg/g-s tömegarány kísérleti sorozataihoz képest (exp. data)

a 100 mg/g kísérleti értékeivel (lásd **2. ábra**). Az eredmények jó egyezést mutatnak a kísérleti adatokkal az abszorbancia időbeni változása tekintetében, azonban a szimulált értékek valódi validálásához új kísérlet sorozatra lenne szükség. Mivel a szimulált sorozat nem haladja meg a kísérleti adatokat, ami az **1b) ábrán** is látható trend alapján várható, az ilyen előrejelzésekkel óvatosan kell bánni.

4. Következtetések

Mesterséges neurális hálózat alapú modelleket fejlesztettünk ki a BAK törlopapíron való adszorpciójának leírására. Megfelelő hálózatokat kapunk, amelyek MAPE értéke 3 (vagy alacsonyabb), az R^2 értéke pedig közel 1. A legjobb architektúramodellt választottuk ki, nemcsak a két teljesítménykritérium alapján, de figyelembe véve annak interpolációs képességét is a betanítási adatok tartományán belül. A kiválasztott modellt tovább alkalmaztuk a bemeneti változók relatív jelentőségének meghatározására az adszorpció folyamat hatékonyságában. Ez utóbbit egy vizes BAK és papír keverék folyadék fázisának abszorbanciájaként értékeltük.

Az időn kívül a legfontosabb változók a BAK és az adszorbens tömegaránya voltak, míg a hőmérséklet volt a legkevésbé befolyásoló paraméter. Az abszorbancia előrejelzését a beta-

nítási tartományon kívüli bemeneti adatok felhasználásával a felső határ mindössze 20%-át meghaladó értékekre kíséreltük meg, és meglehetősen jó átfedés volt az előre jelzett és a meglévő kísérleti eredmények között.

Ebből kifolyólag az általunk kidolgozott modell alkalmasnak tűnik további szimulációk készítésére, mint például: ismeretlen forgatókönyvek előrejelzésére és/vagy a kérdéses adszorpciók folyamat optimalizálására, de csak a betanítási (kísérleti) adatok tartományán belül.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Herdt B. L., Black E. P., Zhou S. S., Wilde C. J.: *Inactivation of SARS-CoV-2 by 2 commercially available Benzalkonium chloride-based hand sanitizers in comparison with an 80% ethanol-based hand sanitizer*. Infection Prevention in Practice, 3. (2021) 100191.
<https://doi.org/10.1016/j.infpip.2021.100191>
- [2] Aodah A. H., Bakr A. A., Booq R. Y., Rahman M. J., Alzaharani D. A., Alsulami K. A., Alshaya H. A., Alsuabeyl M. S., Alyamani E. J., Tawfik E. A.: *Preparation and evaluation of benzalkonium chloride hand sanitizer as a potential alternative for alcohol-based hand gels*. Saudi Pharmaceutical Journal, 29. (2021) 807–814.
<https://doi.org/10.1016/j.jsps.2021.06.002>
- [3] Ogilvie B. H., Solis-Leal A., Lopez J. B., Poole B. D., Robison R. A., Berges B. K.: *Alcohol-free hand sanitizer and other quaternary ammonium disinfectants quickly and effectively inactivate SARS-CoV-2*. Journal of Hospital Infection, 108. (2021) 142–145.
<https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.11.023>
- [4] Kim S., Ji K., Shin H., Park S., Kho Y., Park K., Kim K., Choi K.: *Occurrences of benzalkonium chloride in streams near a pharmaceutical manufacturing complex in Korea and associated ecological risk*. Chemosphere, 256. (2020) 127084.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127084>
- [5] Yang R., Zhou S., Zhang L., Qin C.: *Pronounced temporal changes in soil microbial community and nitrogen transformation caused by benzalkonium chloride*. Journal of Environmental Sciences, (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.04.004>
- [6] Khan A. H., Libby M., Winnick D., Palmer J., Sumarah M., Ray M. B., Macfie S. M.: *Uptake and phytotoxic effect of benzalkonium chlorides in Lepidium sativum and Lactuca sativa*. Journal of Environmental Management, 206. (2018) 490–497.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.077>
- [7] Pereira B. M. P., Tagkopoulos I.: *Benzalkonium chlorides: Uses, regulatory status, and microbial resistance*. Applied and Environmental Microbiology, 85. (2019) 1–27.
<https://doi.org/10.1128/AEM.00377-19>
- [8] Zanini G. P., Ovesen R. G., Hansen H. C. B., Strobel B. W.: *Adsorption of the disinfectant benzalkonium chloride on montmorillonite. Synergistic effect in mixture of molecules with different chain lengths*. Journal of Environmental Management, 128. (2013) 100–105.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.04.056>
- [9] Ndabambi M., Kwon J. H.: *Benzalkonium ion sorption to peat and clays: Relative contributions of ion exchange and van der Waals interactions*. Chemosphere, 247. (2020) 125924.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125924>
- [10] Kim T. K., Jang M., Hwang Y. S.: *Adsorption of benzalkonium chlorides onto polyethylene microplastics: Mechanism and toxicity evaluation*. Journal of Hazardous Materials, 426. (2022) 128076.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128076>
- [11] Ghosh I., Kar S., Chatterjee T., Bar N., Das S. K.: *Removal of methylene blue from aqueous solution using Lathyrus sativus husk: Adsorption study, MPR and ANN modelling*. Process Safety and Environmental Protection, 149. (2021) 345–361.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.003>
- [12] Ahmad Z. U., Yao L., Lian Q., Islam F., Zappi M. E., Gang D. D.: *The use of artificial neural network (ANN) for modeling adsorption of sunset yellow onto neodymium modified ordered mesoporous carbon*. Chemosphere, 256. (2020) 127081.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127081>
- [13] Pai K. N., Nguyen T. T. T., Prasad V., Rajendran A.: *Experimental validation of an adsorbent-agnostic artificial neural network (ANN) framework for the design and optimization of cyclic adsorption processes*. Separation and Purification Technology, (2022) 120783.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120783>
- [14] Fagundez J. L. S., Netto M. S., Dotto G. L., Salau N. P. G.: *A new method of developing ANN-isotherm hybrid models for the determination of thermodynamic parameters in the adsorption of ions Ag⁺, Co²⁺ and Cu²⁺ onto zeolites ZSM-5, HY, and 4A*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 9. (2021) 106126.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106126>
- [15] Gevrey M., Dimopoulos I., Lek S.: *Review and comparison of methods to study the contribution of variables in artificial neural network models*. Ecological Modelling, 160. (2003) 249–264.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00257-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00257-0)

Kénezettnövényolaj-alapú kenőanyag-adalékok alapanyagainak vizsgálata

Investigation of Raw Materials for Sulfurized Vegetable Oil Based Lubricant Additives

Nagy Gábor Zoltán,¹ Lázár Nikoletta,² Nagy Roland³

¹ Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, MOL Ásványolaj- és Széntechnológiai Intézeti Tanszék. Veszprém, Magyarország, gznagy@phd.uni-pannon.hu

² Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, MOL Ásványolaj- és Széntechnológiai Intézeti Tanszék. Veszprém, Magyarország, nikoletta.lazar96@gmail.com

³ Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, MOL Ásványolaj- és Széntechnológiai Intézeti Tanszék. Veszprém, Magyarország, nroland@almos.uni-pannon.hu

Abstract

Extreme Pressure (EP) additives are commonly used in lubricants to reduce wear and prevent seizures at high temperature and pressure. In terms of their mechanism, these build up a film on the surface with chemisorption. This film efficiently prevents metal-metal adhesion. Industrial statistics show that extreme pressure additives are mostly used in metalworking fluids, lubricating greases and engine oils. Sulfurized vegetable oils can be used as EP additives of lubricants. This type of EP additive is ashless, derived from renewable sources and have a lesser negative effect on the environment compared to those that are not derived from vegetable sources. To determine the appropriate vegetable oils to be used as the raw material of EP additives, the structure of triglycerides, cost-effectiveness and availability aspects must be considered. Results of experiments show that rapeseed oil and soybean oil best meet this criteria system.

Keywords: *antiwear, vegetable oil, sulfurized oil, additive.*

Összefoglalás

A berágódásgátló (röviden: EP-) adalékok a kenőanyagokban megtalálható adalékok, amelyeknek célja a kopás csökkentése és a berágódás megakadályozása nagy hőmérsékleten és nyomáson. Hatásmechanizmusukat tekintve kemiszorpcióval hoznak létre a felületen egy filmet, ezáltal a fémszerkezeti anyagok érintkezését meg tudják akadályozni. Legnagyobb mennyiségben az autópárhuzban és fémmegmunkálási segédanyagokban használják fel ezen adalékokat.

Kenőanyagok EP-adalékként alkalmazhatók kénezett növényi olajok. Az ilyen típusú EP-adalékok előnye a nem növényolaj-alapú EP-adalékokkal szemben, hogy hamumentesek, megújuló forrásból származnak és hulladékként kisebb környezeti terhelést jelentenek. Az EP-adalékként felhasználható növényi olajokkal szemben támasztott kritériumoknak, illetve a gazdaságossági és rendelkezésre állási viszonyokat is figyelembe véve a repceolaj és a szójaolaj felel meg a legjobban.

Kulcsszavak: *kopásgátló, növényi olaj, kénezett olaj, adalék.*

1. Bevezetés

1.1. Az EP-adalékok

A korszerű kenőanyagokban különböző adalékokat alkalmaznak abból a célból, hogy azok kü-

lönböző tulajdonságait javítsák, vagy új, kedvező tulajdonságot kölcsönözzenek nekik, és ezáltal a kenőanyagra vonatkozó minőségi követelményeket kielégítsék [1]. Az adalékoknak számos típusa van, az EP-adalékok mellett léteznek de-

tergens-diszpergens adalékok, korróziógátlók, oxidációgátlók stb. A kopásgátló és EP-adalékok célja, hogy a kopást csökkentsék és a berágódást megakadályozzák akár nagyon nagy hőmérsékleten és nyomáson is.

A kopásgátló és az EP-adalékok elhatárolása nem lehetséges teljes mértékben. Egyes adalékok adott helyen való alkalmazása kopásgátló hatást fejtenek ki, míg másik helyen alkalmazva EP-adalékként funkcionálnak. Vannak olyan esetek is, amikor mindkét hatást kifejti az adott adalék. A két adaléktípus hatásmechanizmusa (1. ábra) megegyezik, és csoportosíthatók az aktivitási hőmérsékletük szerint. A kopásgátló adalékok alacsony hőmérsékleten fejtik ki hatásukat, míg az EP-adalékok nagyobb hőmérsékleten [2].

Az EP-adalékok nagyon reakcióképesek, ronthatják az olaj oxidációs stabilitását, színesfémek esetén korróziót okozhatnak, illetve csökkenthetik a csapágyak és egyéb eszközök fáradással szembeni ellenállását [3].

Az EP-adalékokat úgy tervezték, hogy azok megakadályozzák a fém-fém adhéziót vagy összehegedést, abban az esetben, ha az érintkező felületek között lévő természetes védő oxidréteg megszűnik, és az olajban lévő egyéb aktív vegyületek nem elég reakcióképesek ahhoz, hogy megakadályozzák a védőfilm megszűnését. Ez legtöbbször nagy sebességű, nagy terhelésű és/vagy nagy hőmérsékleten történő működés esetén következik be [4, 5].

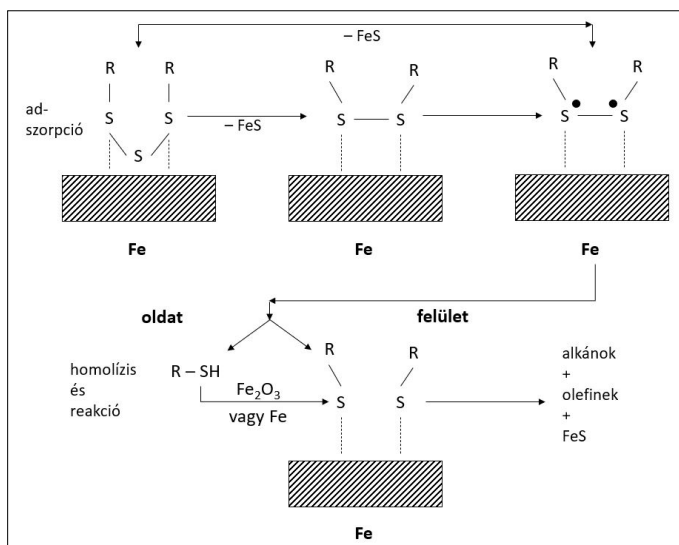
A hatásmechanizmust tekintve ezen adalékok úgy működnek, hogy a fém felületével reagálva

fémvegyületet képeznek a kopásgátló adalékokhoz hasonlóan, de itt a reakció sebessége nagyobb, és a képződő film vastagabb és ellenállóbb, illetve a kialakuló film nyírószilárdsága kisebb, mint a fémnek. Az EP-adalékok képesek a karcolások, kopás és a berágódás megelőzésére nagy sebesség és ütészzerű terhelések esetén. A felhasználás során az EP-adalékok fogynak és a fémek felülete egyenletesen kopik, így simább felület keletkezik, ezért a hidrodinamikai kenés esélye megnő, ami kisebb lokális feszültséget és alacsonyabb súrlódást eredményez [4, 6].

Mind a kopásgátló, mind az EP-adalékok széles választékban rendelkezésre állnak, kiválasztásnál azonban figyelembe kell venni többek között gazdasági szempontokat, az olajban való oldhatóságot és az adalék oxidációs stabilitást csökkentő hatását is [4, 7].

Kénezzett EP-adalékok előállításához mindenekeelőtt kénezzhető vegyületre és kénezző vegyületre van szükség. A reakció szelektivitását katalizátor alkalmazásával lehet javítani. Kénezzhető vegyületekként egy vagy több kettős kötést tartalmazó vegyületeket alkalmaznak. Ilyenek a növényi olajok, zsírsavak és zsírsav-észterek, továbbá olefinek, akrilátok és metakrilátok. Kénezző vegyületeknt elterjedten alkalmazták az ortorombos elemi ként, illetve a kén-hidrogént. Ezek mellett egyéb kéndonorok is alkalmazhatók, melyek szerkezetükben kötve tartalmazznak ként, ilyenek például a merkaptánok [1, 2, 4].

A kutatómunka jelenlegi fázisában célkitűzésünk az volt, hogy megvizsgáljuk a kénezzett növe



1. ábra. Az EP-adalékok hatásmechanizmusának lépései vas fémfelület esetén

nyolaj-adalékok gyártásához szakirodalmi adatok alapján alkalmazható növényolajok körét, illetve összehasonlítsuk azokat az EP-adalékok szintézisé szempontjából kiemelt jelentőséggel bíró tulajdonságok alapján. Továbbá célunk volt, hogy kiválasszuk azon növényolajokat, amelyek kedvező eredménnyel alkalmazhatók kénezett növényi olaj alapú EP-adalékok előállítására.

1.2. Növényi olaj

A növényi olajok értéke és alkalmazási területe azok zsírsavösszetételétől függ, így mivel mindegyik növényi olajnak különböző fizikai és kémiai tulajdonságai vannak, ezért a felhasználási területük is különböző. Például a 12 szénatomos oldalláncú vegyületet (pl. laurinsav) tartalmazó olajok a detergens és felületaktív anyagok előállításának fontos nyersanyagai, míg a 18–22 szénatomos oldalláncú vegyületeket (pl. olajsav) tartalmazó olajokat kenőanyagokban vagy polimer adalékként használják fel [4, 8].

Régiókat tekintve mind a termelés, mind pedig a felhasználás területén az ázsiai piac dominál. Az európai piacon legnagyobb mennyiségben bio-kenőanyagként használt növényi olaj a repceolaj, az USA-ban a repceolaj, a napraforgóolaj és a szójababolaj. Ezek mellett a ricinusolajnak, a kukoricaolajnak és a sáfrányolajnak a szerepe kicsi [8].

A viaszészterek hosszú szénláncú zsírsavak és hosszú szénláncú zsíralkoholok oxo-észterei. A természetes eredetű viasz-észterek észterek elegyei, de mellette tartalmaznak szénhidrogéneket is. A viasz-észtereknek kiválóak a teljesítménytulajdonságaik, ugyanis nagy az oxidációs stabilitásuk és jól ellenállnak a hidrolízisnek. Emiatt az EP-adalékok alkalmazási körülményei mellett is stabil adalékvegyületek szintetizálhatók felhasználásukkal. Az egyes növényi olajok oxidációs stabilitását az **1. táblázat** szemlélteti [4, 8].

1. táblázat. Növényi olajok oxidációs stabilitási indexének összehasonlítása

Növényi olaj	Oxidációs stabilitási index 110 °C-on
Nyers tajtékvirágolaj	246,9
Finomított tajtékvirágolaj	67,3
Hidegen sajtolt jojobaolaj	55,9
Nyers jojobaolaj	34,5
Finomított jojobaolaj	31,4
Finomított szójababolaj	19,9
Finomított ricinusolaj	56,1

A lineáris szerkezet korróziógátló, habzágátló, kopás- és súrlódáscsökkentő hatást kölcsönöz a kenőanyagoknak. Ezen tulajdonságai miatt nagy hőmérsékleten és nyomáson üzemelő kenőanyagok, például hidraulikus fluidumok és EP-adalékok kiváló alapanyagok. A viasz-észterek semleges lipidek, amelyek szobahőmérsékleten szilárd halmazállapotúak, és a természetben korlátozottan állnak rendelkezésre (ámbráscet-olaj, jojobaolaj) [8].

2. Eredmények

2.1. EP-adalék-alapanyagként felhasználható növényi olajok vizsgálata

EP-adalékok növényi olaj alapanyagaként alkalmazhatók hosszú szénláncú zsírsavak glicerinnel alkotott észterei, a triészterek. Ilyenek például a fehértajtékvirág-olaj, repceolaj, tátorjánolaj, szójababolaj, mogyoróolaj, napraforgóolaj, olívaolaj, kukoricaolaj, kókuszolaj és a palmaolaj. A triészterek mellett alkalmazhatók monoészterek, például a jojobaolaj, amely hosszú telítetlen szénláncú zsírsavak és hosszú telítetlen szénláncú alkoholok észtere. Alkalmazható triészterek és monoészterek keveréke is. A nem étkezési célú alapanyagok (a ricinusolaj, fehér tajtékvirágolaj, tátorjánolaj) előnyt élveznek a piacon, mind gazdasági, mind pedig környezetvédelmi megfontolásból [8].

2.1.1. Fehér tajtékvirágolaj

A fehér tajtékvirág egy évelő növény, amely az USA északnyugati régiójában őshonos. Az olajat a magjaiból nyerik ki, amelyek körülbelül 27% olajat tartalmaznak [9].

A nyers fehértajtékvirág-olaj hosszú szénláncú zsírsavakat (97% ≥ C20) tartalmaz, emiatt nagyon stabil és egyedi telítetlen hosszú szénláncú zsírsavak forrása. Ezen egyedi kémiai összetételének köszönhető, hogy számos fejlesztés folyik arra, hogy ipari olajnövényé váljon. Bomlása során monoén zsírsavak keletkeznek, ezáltal például szokatlanul nagy az oxidációs stabilitási indexe más növényi olajokhoz hasonlítva, ezt az **1. táblázat** is jól szemlélteti.

Emiatt olyan területek számára ajánlott a felhasználása, amely nagyon értékes termékeket állít elő [8].

Hátránya azonban, hogy a dién szerkezete kénezés során oldhatósági problémákat okoz, ennek oka a keresztkötések létesítése. Az olajat két órán keresztül, 180 °C-on, 20% kénnel kénezve a kapott termék szinte oldhatatlan szénhidrogén-olajokban [9].

2.1.2. Repceolaj

A repceolaj összetételét tekintve nagy mennyiségben (kb. 60%) egyszerűen telítetlen olajsavból áll, és kisebb mennyiségben (kb. 5,5%) telített zsírsavakat tartalmaz. A repceolajok fő hátránya, hogy viszonylag nagy a linolsav- (C18:2) és linolénsav- (C18:3) tartalma.

A repceolaj kiválóan alkalmazható biotechnológiai eljárásokban. A repcében befolyásolható az olaj szintézise, amely segítségével specifikus, kémiaiilag megváltoztatott triglicerideket lehet előállítani. A nagy olajsavtartalom miatt az élelmiszeriparban kedvelt alapanyag a megfelelő minősége és csekély telítettzsírsav-tartalma miatt [8].

2.1.3. Tátorjánolaj

A tátorján egy Etiópiában őshonos, szárazságtűrő, alacsony tápanyagigényű növény, amelyet ipari méretekben természetesen és dolgoznak fel az USA-ban 1990 óta. A tátorjánmagok olajtartalma kb. 30%, amelynek nagy az erukasav- (> 50 % C22:1) tartalma és kicsi a szabadzsírsav-tartalma (< 0,5 %).

A finomított tátorjánolajat főleg erukasavforrásként alkalmazzák, de számos kutatás folyik vissz-észterre alakítására (EPOBIO-projekt) is, mely formában kenési célokra alkalmazható lenne, így EP-adalék alapjaként is.

Nagy mennyiségben tartalmaz azonban linolsavat és linolénsavat, amelyek negatívan befolyásolják az oxidációs stabilitást. Az erukasavnak köszönhető a nagy viszkozitásérték, de negatív hatással van a hidegfolyási tulajdonságokra a nagy olvadási hőmérséklete miatt [8].

2.1.4. Jojobaolaj

A kénezett ámbráscetolaj betiltása után számos kutatás folyt annak helyettesítésére az 1970-es évek végén. Az egyik lehetőség az ámbráscetolaj kiváltására a jojobaolaj, melynek számos előnye van, így például, hogy kellemesebb illatú, mint a halszagú ámbráscetolaj. Továbbá a nyers jojobaolaj nem tartalmaz glicerideket, így kevesebb tisztító lépésre van szükség a felhasználás előtt [9].

A jojoba növény egy örökzöld cserje, melynek apró magok a termései. Sokféle területen felhasználják, például a gyógyszeriparban, kozmetikaiparban és biohajtóanyag-gyártás során is. Hátránya azonban, hogy az éves termelése 5 kt, amely a globális kereskedelmi igényeket nem elégti ki [8].

A jojobaolaj kémiai összetételét tekintve, kis mennyiségben nem tartalmaz glicerideket, és ve-

gyületei nagy részének szénatomszáma 36 és 42 közé esik. Ezen szűk szénatomszám-tartomány és a lineáris szerkezet az, ami egyedi tulajdonságokat kölcsönöz a jojobaolajnak. Tehát a jojobaolaj egy monoészter, melynek nagy a molekulatömege és egyenes láncú zsírsavakból és zsíralkoholokból épül fel, melyek kettős kötést is tartalmaznak. A molekulászerkezetet a **2. ábra** reprezentálja, melyen m és n 8–12 közötti.

A jojobaolajat főleg decil-alkohol zsírsav-észterei alkotják. Előnyös tulajdonságai közé tartozik, hogy szokatlanul nagy az oxidációs stabilitása, főleg nagy hőmérsékleten. Kimutatták, hogy ez a benne lévő tokoferolnak és egyéb természetes antioxidánsoknak köszönhető részben vagy egészben [10].

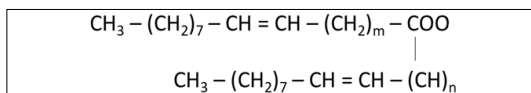
Fizikai tulajdonságait tekintve szerves oldószerekben jól oldódik, de nem elegyedik etanollal, metanollal, ecetsavval és acetonnal sem. Kis savtartalommal rendelkező, világos arany színű, nem illékony folyadék. Számos egyéb fizikai tulajdonságát a **2. táblázat** foglalja össze.

2.1.5. Szójababolaj

A szójabab Északkelet-Ázsiában őshonos, ahol mérsékelt övi éghajlat van. A szójabab érzékeny a hőmérséklet-változásra, és négy különböző évszakot igényel. A világon termesztett szójabab becslült mennyisége 257,5 millió tonna, és a fő szójababtermesztő országok az USA és Argentína.

2. táblázat. A jojobaolaj főbb tulajdonságai

Paraméter	Érték	Tesztmódszer
Sűrűség (g/cm ³)	0,863	ASTM D-1298
Törésmutató, n _{D20}	1,4652	ASTM D-1218
Kinematikai viszkozitás 40 °C-on (cSt)	26	ASTM D-445
Kinematikai viszkozitás 100 °C-on (cSt)	7,5	ASTM D-445
Viszkozitásiindex	257	ASTM D-189
Savszám (mgKOH/g)	2,0	ASTM D-664
Lobbanáspont (°C)	310	ASTM D-92
Jódszám (gI ₂ /100 g)	80	ASTM D-2075
Átlagos molekulatömeg (g/mol)	604	GPC



2. ábra. A jojobaolaj molekulászerkezete

A finomított szójababolaj jó kenőanyag, de számos alkalmazás esetében nem előnyös, mert túl gyorsan oxidálódik. Ezen probléma és ezáltal rövid elállási ideje több módon is kiküszöbölhető, például kémiai módosítással (részleges hidrogénezéssel és epoxidációval), adalékok alkalmazásával, pálmaolajjal végzett észterestéssel vagy esetleg jojobaolajjal való keveréssel. A jojobaolaj hatékonyan csökkenti a hidroperoxid és egyéb illékony komponensek keletkezését a szójababolajban, ezáltal minden jojobaolaj-szójababolaj keverék stabilabb, mint a tiszta szójababolaj. Ezek elegyítése 80:20 szójababolaj:jojoba olaj arányban a leghatékonyabb a szójababolaj oxidációs stabilitására nézve [8].

2.2. EP-adalék alapanyagként felhasználható növényi olajok kiválasztása

Sokféle növényi olaj létezik, melyek mindegyikének eltérő a szerkezete, és ezáltal a tulajdonságai is. Az EP-adalékként alkalmazható növényi olajokkal szemben támasztott kritériumoknak a jojobaolaj, a fehér tajtékvirágolaj, a repceolaj és

3. táblázat. Vizsgált növényolajok jellemző összetétele

Növényolaj	A növényolajat felépítő trigliceridek átlagos zsírsaveloszlása, %			
	< C18	C18	C20	C22 <
Fehértajtékvirág-olaj	0,6	2,1	65,7	31,6
Repceolaj	4,8	88,1	2,4	4,7
Tátorjánolaj	3,6	34,3	10,7	51,4
Jojobaolaj	1,8	78,5	0,2	19,5
Szójababolaj	11,4	83,3	0,5	4,8

4. táblázat. Vizsgált növényolajok alkalmazhatósága

Növényolaj	Alkalmasság EP-adalék-szintézishez	Regionális elérhetőség	Alapanyag-költség
Fehértajtékvirág-olaj	Alkalmos	Nehezen elérhető	Nagy
Repceolaj	Kiválóan alkalmas	Könnyen elérhető	Kicsi
Tátorjánolaj	Alkalmos	Nehezen elérhető	Nagy
Jojobaolaj	Kiválóan alkalmas	Nehezen elérhető	Nagy
Szójababolaj	Kiválóan alkalmas	Elérhető	Közepes

a tátorjánolaj felel meg a legjobban, továbbá alkalmazható még a szójababolaj is. Mindemellet ezek keverékének vizsgálata is megfelelő eredményt mutathat.

Korábbi hivatkozás alapján kenőanyag-adalék szintézis alapanyagaként kedvezően a C18–C22 közötti szénatomszámú zsírsavláncot tartalmazó trigliceridek alkalmazhatók [4, 8]. Ennek a feltételnek a vizsgált növényolajok közül leginkább a repceolaj, a jojobaolaj és a szójaolaj felel meg, melyekben a legnagyobb arányban találhatóak ebbe a szénatomszám-tartományba eső trigliceridek. A vizsgált növényolajokban megtalálható zsírsavak átlagos eloszlását a 3. táblázat tartalmazza [9, 10].

A vizsgált növényolajok közül a korábban alkalmazott ábráscetolaj összetételének a jojobaolaj összetétele felel meg, hiszen ez hasonlóan viasz-észter, amelyek egyik alkalmazás szempontjából fontos tulajdonsága a nagy oxidációs stabilitása. A jojobaolaj használata azonban rendelkezésre állási és gazdasági szempontokból sem előnyös.

A jojobaolajhoz hasonlóan a fehér tajtékvirágolaj és a tátorjánolaj sem áll rendelkezésre megfelelő volumenben Európában. Mindemellet a tátorjánolajat viasz-észterre kellene alakítani annak érdekében, hogy felhasználható legyen EP-adalék alapjaként, ez további költségvonzattal jár.

A vizsgált növényolajok szintézishez való felhasználhatósága, illetve alkalmazásuk gazdasági szempontból való értékelése a 4. táblázatban került röviden összefoglalásra.

Ezen okokból kifolyólag a további kutatásaink során a repceolaj és a szójababolaj, esetleg ezek elegyének alkalmazása esetén várható kedvező eredmény.

3. Következtetések

A szakirodalmi közleményekben fellelhető információk alapján megvizsgáltuk azon növényolajok körét, amelyek a publikált eredmények alapján leginkább alkalmasak kénezett növényolaj-alapú EP-adalékok előállítására.

A szakirodalmi adatok áttanulmányozása alapján megállapítható, hogy az EP-adalékként felhasználható növényi olajok zsírsavkomponenseinek szénatomszáma 18 és 22 közötti kell legyen, mindemellet a zsírsavak 90%-ának előnyösen egy, de maximum három kettős kötést kell tartalmaznia.

Az eredmények összevetése alapján, illetve gazdaságossági és rendelkezésre állási viszonyokat

is figyelembe véve a kutatás következő, kísérleti fázisában a repceolajat és szójababolajat, esetleg ezek elegyét fogjuk alkalmazni EP-adalékminták szintéziséhez.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Theo M., Wilfried D.: *Lubricants and Lubrication*. Second Edition. Wiley, Weinheim, 2007. 88–119.
- [2] Syed Q. A. R.: *A Comprehensive Review of Lubricant Chemistry, Technology, Selection and Design*. ASTM International, West Conshohocken, PH, 2009. 149–181.
- [3] Pradeep L. M., Sudeep P. I., Michael N., Satish V. K., Michael R. L.: *Tribology for Scientists and Engineers*. Springer, New York, NY, 2013. 317–318.
- [4] Leslie R. R.: *Lubricant Additives. Chemistry and Applications*. Third Edition. CRC Press, Boca Raton, FL, 2017. 211–278.
- [5] Vámos E.: *Tribológiai kézikönyv. Gépek és gépelemek súrlódása, kopása, kenése*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983. 36–116.
- [6] Theo M., Kirsten B., Thorsten B.: *Industrial Tribology. Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication*. Wiley, Weinheim, 2011. 320–335.
- [7] Don M. P., Martin W., Ekkehard D.: *Lubrication Fundamentals*. Third Edition. CRC Press, Boca Raton, FL, 2016. 35–60.
- [8] Theo M.: *Encyclopaedia of Lubricants and Lubrication*. Springer, Berlin, 2014. 131–146.
- [9] Frank L. E., Phillip S. L., Robert E. A.: *Vegetable oil derivatives as lubricant additives*. EP0353872A1, USA, 1979.
- [10] Edward W. B.: *Wax esters of vegetable oil fatty acids useful as lubricants*. US4152278, USA, 1979.

A hegesztés során képződő UV-sugárzás egészségkárosító hatásának elemzése

Analysis of the Harmful Effects of UV Radiation Generated During Welding

Schramkó Márton,¹ Kafi Abdallah,² Kovács Tünde Anna³

¹ Óbudai Egyetem, Anyagok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest, Magyarország, schramko.marton@bgk.uni-obuda.hu

² Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola, Budapest, Magyarország, abdallahkafi1994@gmail.com

³ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék, Budapest, Magyarország, kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

Arc welding produces several harmful health effects on the welder. The authors aimed to determine the intensity of ultraviolet (UV) radiation as a function of distance from the welding. The research focused on the UV radiation generated during the arc welding process as it is a widely used process in industrial practice today. During the experiment, several tests were performed on the gas metal arc welding process (GMAW). This procedure is also used automated in the industry, so research can help to designate a specific safety zone in an industrial area so that there is no need to separate the welder robot with a curtain, but at the same time be able to move around them. Where the production is not fully automated yet, it highlights the problems which cause possible damage to health and helps create safer working conditions.

Keywords: *ultraviolet radiation; arc welding; safety zone.*

Összefoglalás

Az ívhegesztésnek számos egészségkárosító hatása van a hegesztőre. A szerzők az ultraibolya (UV) sugárzás intenzitását határozták meg a hegesztőtől való távolság függvényében. A kutatás az ívhegesztési folyamat során keletkező UV sugárzásra fókuszált, mivel az ívhegesztés ma már széles körben alkalmazott eljárás az ipari gyakorlatban. A kísérlet során több mérést is végeztek a védőgázos ívhegesztés hatására keletkező UV sugárzás meghatározására. A védőgázos ívhegesztési eljárást az iparban automatizáltan is alkalmazzák, így a kutatás célja ipari alkalmazás esetén a biztonsági zóna kijelölése a káros sugárzás intenzitása alapján, hogy ne kelljen függőnnyel lehatárolni a hegesztőrobotot munkavégzés során. A virtuális biztonsági zóna határához közeledő személyt jelzés figyelmezteti. A robotok között ez a megoldás könnyű mozgást tesz lehetővé. Amennyiben a gyártás még nem teljesen automatizált, ott a kísérleti eredmények rávilágítanak azokra a problémákra, amelyek egészségkárosodást okozhatnak, és segíthetik a biztonságosabb munkakörülmények megteremtését.

Kulcsszavak: *ultraibolya sugárzás; biztonsági zóna; ívhegesztés.*

1. Az UV sugárzás hatásai

Az ultraibolya, röviden UV sugárzás a látható fénynél kisebb, a 100 és 400 nm közti hullámhossztartományba eső elektromágneses sugárzás.

Az UV-tartomány tovább bontható a 315–400 nm közti UV-A, a 315–280 nm közti UV-B, illetve a 280–100 nm közötti UV-C sugárzásra [1]. Az UV-sugárzás fő forrása a földön a napsugárzás. A földfelszínre legnagyobb mennyiségben

UV-A érkezik, az UV-B nagy részét, az UV-C teljes egészét elnyeli a sztratoszférában található ózonréteg. Azonban az ívhegesztés során a készülék az UV sugárzás teljes spektrumát kibocsátja [2].

Az UV sugárzás erős kölcsönhatásba lép élő organizmusokat felépítő molekulákkal, károsítva azokat, így komoly egészségügyi kockázatot jelent az UV sugárzásnak történő fokozott kitettség.

Az akut egészségügyi hatásaira jól ismert példák közé tartozik a keratoconjunctivitis és az erythema.

Az UV-C sugárzást a szaruhártya, az UV-B és UV-A sugárzást szintén a szaruhártya, illetve a szemlencse nyeli el, a retinát csak csekély mennyiségű UV sugárzás éri el [3]. A keratoconjunctivitis a szaruhártya gyulladással állapota, mely kellemetlen tünetekkel jár, mint a fájdalom, idegen test érzése a szemben, homályos látás, fényérzékenység, könnyezés és szemhéjgörcs. A tünetek 2 napon belül maguktól elmúlnak [4].

Az UV sugárzás okozta erythema, vagyis bőrpír fokozott véráramlás a bőrfelszíni kapillárisokban. Az UV-B és UV-C sugárzás direkt DNS-károsító hatása révén jön létre. A károsodást a szervezet felismeri, majd számos védekező mechanizmust indít be, beleértve a DNS-javítást a károsodás visszafordítása érdekében, az apoptózist és a hámleadást a helyrehozhatatlanul károsodott bőrsejtek eltávolítása céljából, valamint a fokozott melanintermelést a jövőbeli károsodások megelőzésére [5].

Az UV sugárzás számos krónikus folyamatot is indukálhat a szervezetben.

Az UV-B és UV-C sugárzás közvetlenül, illetve az UV-A-val együtt közvetve, reaktív oxigén gyököket létrehozva károsítják a DNS-t. Ez korai bőröregedést, a bőr tónusvesztését, ráncok kialakulását okozza, metalloproteinázok indukálódnak, amik hasítják a bőr rugalmasságát biztosító strukturális fehérjét, a kollagént [6].

Az UV sugárzásnak való hosszú távú kitettség és az ennek következtében létrejövő DNS-károsodásnak az idő előtti bőröregedésnél sokkalta súlyosabb következményei is lehetnek. Az UV sugárzás köztudottan karcinogén, speciális DNS-szekvenciák, úgynevezett protoonkogének és immunszuppresszor gének károsodása, és nem megfelelő javítása rák kialakulásához vezethet [7].

A UV sugárzás továbbá immunszuppressziót is indukál, ami súlyosbítja a fertőző betegségek lefolyását, illetve tovább növeli a bőrrák kialakulásának valószínűségét [8].

A szembe jutó UV sugárzás komoly rizikófaktora olyan súlyos, látásvesztést okozó betegségek kialakulásának is, mint a szürkehályog és makuladegeneráció [9].

1.1. UV sugárzás megengedett mértéke

Az UV sugárzásra értelmezhető egy napi maximális határérték, mely megadja, hogy az adott dolgozó mennyi időt tartózkodhat egy adott intenzitás mellett az UV-nak kitett területen. Ez a határérték mW/cm^2 -ben van megadva, és a napi megengedett érték 3 mW/cm^2 , ennél nagyobb mennyiség már károsíthatja a dolgozót. Ennek értelmezésében segítséget adhat az egyik mérésünk, melyet egy borús téli napon a szabadban végeztünk, ahol a napból származó UV sugárzás mértéke 0,001–0,002 mW/cm^2 -v volt. Ebből következne, hogy 30–60 percet lehetne tölteni a szabadban. Ez azonban módosul, ugyanis a határérték megadásánál az UV-C sugárzást is figyelembe vesszük, amit az ózonréteg teljes mértékben kiszűr, így az értékek pozitívan módosulnak [3].

Az ultraviola sugárzásra megállapíthatunk egy napra értelmezhető biztonsági értéket. Ennek kiszámítására a következő két összefüggés ismertére van szükség (1), (2):

$$E_{eff} = \sum_{180}^{400} E_{\lambda} \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (1)$$

$$t_{max} = \frac{3 \text{ mJ/cm}^2}{E_{eff}} \quad (2)$$

Az első összefüggés megadja a sugárzás hatásfokát, a második pedig a napi megengedett határértéket. A sugárzás hatásfokát megadó összefüggésben a E_{λ} a sugárzás, $W/(cm^2 \cdot nm)$; $S(\lambda)$ relatív spektrális hatékonyság; $\Delta\lambda$ a középső hullámhossz, nm. A második összefüggésben a 3 mJ/cm^2 értéke a napi megengedett értéknek felel meg, ezt, ha értelmezni szeretnénk a mérőműszerrel, azt kapjuk, hogy 1 másodpercig tehetjük ki magunkat 3 $mW/(cm^2 \cdot nm)$ -es UV sugárzásnak egy nap során [10].

Ezt az értéket a szervezet a nap során gyűjti össze, és védőfelszerelés nélkül gyorsan elérheti a határértéket. Itt érdemes megemlíteni, hogy ahogyan a sugárzás terjed, a levegőben a sugárzás mértéke nagymértékben csökken a távolság függvényében. Továbbá hegesztés közben az ívfény hullámhossz-kibocsátása változik a közeg (védőgáz) függvényében aszerint, hogy a közeg milyen tartományban bocsát ki nem látható, illetve látható fényt [3].

2. Kísérlet

Az ívhegesztés esetében az UV sugárzás egy elkerülhetetlen veszélyforrás. Jelenleg is alkalmaznak emiatt egyéni védőeszközöket, például: a bőrfelületek ruhákkal való eltakarása vagy a hegesztőmaszkok, -pajzsok vagy védőszemüvegek. Ezeket a védőfelszereléseket sok éve használják, melyek főleg az UV fény elnyelésére, kitakarására koncentrálnak, és csak a közvetlen viselőt védik. A hegesztőcsarnokokban függönyökkel, paravánokkal választják le az egyes hegesztőállomásokat, így védve a többi hegesztőt. A felvetésünk abból adódott, hogy az adott sugárzási intenzitásnak az ismeretében kialakítható egy biztonsági zóna, miközben nincs szükség az állomások teljes eltakarására. Így, ha valaki szeretne közöttük közlekedni, ezt könnyen megteheti, és nem kell viselnie védőfelszereléseket, csak tartania kell a kijelölt útvonalakat.

2.1. A kísérlet menete

Irodalomkutatásban találtunk mérési eredményeket, melyeket referenciaként használtunk kísérleteink értékelésénél. A kísérlet fő célja, hogy mérje az adott idő alatt leadott ultraviola sugárzás mértékét, és ennek segítségével a távolság függvényében megadjon egy napi maximum értéket, melynek a szervezetre ki lehet téve. Ennek a mennyiségnek a betartása fontos, hiszen az ajánlás figyelmen kívül hagyása könnyen okozhatja a már előzetesen ismerttetett egészségügyi problémák kialakulását.

A varratokat egy hegesztőgép segítségével hegesztettük, melyen könnyen szabályozhatók mind a hegesztési paraméterek, mind a gázkeverékek kiválasztása tekintetében. A cél a kísérlet során a különböző gázkeverékek UV kibocsátására gyakorolt hatásának megismerése volt. A kísérlet elrendezését az 1. ábra szemlélteti.

A mérések során megállapítottuk, hogy az egyes védőgázkeverékek befolyásolhatják az ultraviola sugárzás mértékét. Ezen kívül végeztünk méréseket, hogy más hegesztési eljárás esetében hogyan változhat az UV-kibocsátás, és érdekes volt megfigyelni, hogy egy TIG-hegesztés esetében azonos anyag és védőgáz mellett sokkal alacsonyabb értékeket tudunk mérni, ami pozitívum, hiszen ez az eljárás még nagyon széles körben manuális hegesztési eljárás.

Kapott mérési eredményeink közül néhány jellemző értéket az 1. táblázat tartalmaz a teljesség igénye nélkül. A mérést több pontból végeztük, és az ív mozgása miatt a távolság változott, így a ka-

pott értékeink egy tartományként jelennek meg. Ezen adatok segítségével bemutatható a fény terjedése. A gáz, melyet védőgázként használtunk a teszthez, szén-dioxid (CO₂) volt, és az alkalmazott alapanyag S235 acél. A hegesztést SG2 hozaganyaggal végeztük, 7 m/perc-es előtolással és 18 l/perc-es védőgáz-adagolással, valamint 171 A áramerősség beállításával.

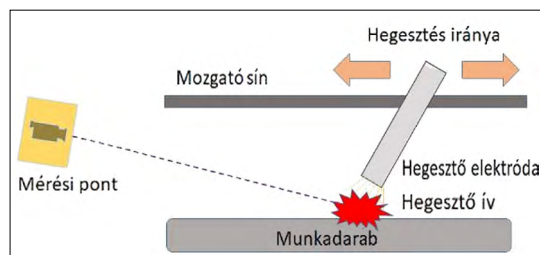
Az eredményekből jól látható, hogy a távolság függvényében milyen nagy változás következik be már 1 m távolság esetében az ultraviola sugárzás intenzitásában. Ahogy a sugárzás terjed a közegben (levegőben), viszonylag gyorsan csökken az intenzitása a távolság függvényében. Ha helyesen jelöljük meg a távolságokat, könnyen kézben tartható lehet a probléma.

A szakirodalomban találtunk olyan kutatást, ahol azonos védőgázzal végeztek kísérleteket, ezekkel vetettük össze az eredményeinket. Az Otokpa O., E., Usman Y. B. kutatócsapat által végzett eredményeket a 2. ábra tartalmazza [11].

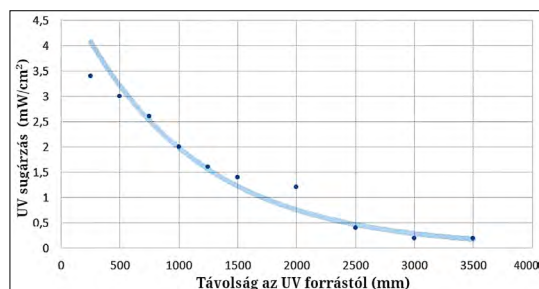
A diagram egy hasonló védőgázzal végzett kísérlet eredményeit mutatja, de az alkalmazott áramerősség nagyobb volt. A diagramból leolvasható az UV-terjedés jellege, azonban nem teljesen azonos a saját eredményeinkkel.

1. táblázat. UV-adatok a távolság függvényében

Távolság (m)	0,5	1	1,5
UV sugárzás mW/(cm ² ·nm)	1,1–2,3	0,34–0,6	0,095–0,2



1. ábra. A mérés sematikus ábrája



2. ábra. Az UV-intenzitás a távolság függvényében

3. Következtetések

A kutatásunk jelenlegi állásaként elmondhatjuk, hogy a kísérletek eredményei alátámasztják a feltevést, miszerint a távolság függvényében a védőgáz és a hegesztési eljárás ismeretében ki tudunk alakítani egy adott biztonsági zónát. A zóna meghatározásához azonban szükséges ismerni, hogy egy adott dolgozó mennyi időt fog eltölteni a gépek között mozogva, ugyanis még 2,5 m távolságban is csak viszonylag kevés időt megengedett eltölteni a hegesztőberendezések mellett. Véleményünk szerint a gépek elhelyezésével érdemes lenne egy modellt készíteni, mely az útvonalat a haladási sebességgel együtt kiszámolhatóvá teszi.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Gallagher R. P., Lee T. K., Bajdik C. D. & Borugian M.: *Ultraviolet radiation*. Chronic diseases in Canada, 29/1. (2010) 51–68.
<https://doi.org/10.24095/hpcdp.29.S1.04>
- [2] Dixon A. J. & Dixon B. F.: *Ultraviolet radiation from welding and possible risk of skin and ocular malignancy*. Medical Journal of Australia, 181. (2004) 155–157.
<https://doi.org/10.5694/j.1326-5377.2004.tb06207.x>
- [3] Takahashi J., Nakashima H., Fujii N., Okuno T.: *Comprehensive analysis of hazard of ultraviolet radiation emitted during arc welding of cast iron*. Journal of Occupational Health, 62. (2019) 1–10.
<https://doi.org/10.1002/1348-9585.12091>
- [4] Hussey M., Wu B., Moore L. A. & Ferrreira J. T.: *Review of photokeratitis : Corneal response to ultraviolet radiation (UVR) exposure*. African Vision and Eye Health, 69. (2010) 123–131.
<https://doi.org/10.4102/aveh.v69i3.137>
- [5] Sklar L. R., Almutawa F., Lim H. W. & Hamzavi I.: *Photochemical & Photobiological Sciences*. Photochemical & Photobiological Sciences, 12. (2013) 54–64.
- [6] Berneburg M., Plettenberg H. & Krutmann J.: *Photoaging of human skin*. Photodermatology, Photoimmunology and Photomedicine, 16. (2000) 239–244.
- [7] Narayanan D. L., Saladi R. N., Fox J. L.: *Ultraviolet radiation and skin cancer*. International Journal of Dermatology, 49. (2010) 978–986.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-4632.2010.04474.x>
- [8] Norval M., Halliday G. M.: *The Consequences of UV-Induced Immunosuppression for Human Health*. Photochemistry and Photobiology, 87. (2011) 965–977.
<https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2011.00969.x>
- [9] Roberts J. E.: *Ultraviolet Radiation as a Risk Factor for Cataract and Macular Degeneration*. Eye & Contact Lens: Science & Clinical Practice, 37. (2011) 246–249.
<https://doi.org/10.1097/ICL.0b013e31821cbcc9>
- [10] *TLVs and BEIs Based on the Documentation Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices*. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2022.
- [11] Otokpa O. E., Usman Y. B.: *An assessment of ultraviolet radiation components of light emitted from electric arc and their possible exposure risks*. Global Journal of Pure and Applied Sciences, 19/2. (2013) 145–149.
<https://www.ajol.info/index.php/gjpas/article/view/118658>

Csőperemezéshez használt szerszámacélok összehasonlítása

Comparison of Tool Steels for Tube End Flanging

Trautman Bence,¹ Tóth László,² Fábíán Enikő Réka³

¹ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Anyag- és Gyártástudományi Intézet, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék Budapest, Magyarország, bencetrautman1@gmail.com

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Anyag- és Gyártástudományi Intézet, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék Budapest, Magyarország, toth.laszlo@bgk.uni-obuda.hu

³ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Anyag- és Gyártástudományi Intézet, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék Budapest, Magyarország, fabian.reka@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

One of the most important components of a tube end flanging machine is the flanging tool, which is subjected to mechanical stresses such as compression, bending and abrasion. It is therefore very important to choose the optimal material and manufacturing technology for the flanging tool. Böhler tool steel grades K110 and K340 were chosen as the subject of our research. Both materials were used to produce tube flanging tools, which were subjected to hardness testing, microscopic examination and surface wear testing after simple cooling or deep cooling and triple high temperature tempering after austenitisation in a vacuum at elevated temperature. Based on the measurements, the deep cooled and triple tempered K340 steel was found to be the most favourable tool steel for the production of the tube flanging tool.

Keywords: *tool steel, tube flanging, heat treatment, wear resistance, microstructure.*

Összefoglalás

A csőperemező gép egyik legfontosabb eleme a peremezőszerszám, amely számos mechanikai igénybevételnek van alávetve, mint például nyomó, hajlító és koptató, ezért nagyon fontos a peremezőszerszám optimális anyagának és gyártási technológiájának megválasztása. Kutatásunk tárgyaként a Böhler K110, illetve K340 szerszámacél minőséget választottuk. Mindkét anyagból gyártottunk csőperemező szerszámokat, melyeken – vákuumban való emelt hőmérsékleten történt ausztenítésítést követően egyszerű hűtés, illetve mélyhűtés és háromszori, nagy hőmérsékletű megeresztés alkalmazása után keménységvizsgálatot, mikroszkópos vizsgálatot és felületi kopásvizsgálatot végeztünk. A mérések alapján a mélyhűtéssel gyártott K340 acél bizonyult a legkedvezőbb szerszámacél-alapanyagának a csőperemező szerszám gyártásához.

Kulcsszavak: *szerszámacél, csőperemezés, hőkezelés, kopásvizsgálat, szövetszerkezet.*

1. Bevezetés

A napjainkban használatos csőkarimák igen hosszú múltra tekintenek vissza, és az új gyártási technológiák megjelenésével sok, korábban ismert gyártási módszert szorítottak háttérbe (például: vak- és menetes karimák), illetve ezzel egy időben – mint minden más területen is – kialakult a szabványosítás iránti igény a felcserélhetőség érdekében. Karimák segítségével csatlakoztat-

ják ugyanis a csővezetékekhez a berendezéseket (szivattyúk, szelepek stb.) vagy további csőveket, és alkalmazásuk nagyban könnyíti a későbbi szerelés vagy javítás esetén a csövekhez való hozzáférhetőséget, ha a rendszeren belül szükséges javítást orvosolni. Ezen kialakítás szükséges, amennyiben nagy nyomás alatt üzemelő berendezéseket és vezetékeket terveznek. A karimák készítéséhez rentábilis szerszámra van szükség,

hiszen a technológia sokrétű felhasználása fémjelzi, hogy annak tömeggyártása költséghatékony módon kell történnjen, mégsem mehet az a szerzőszám élettartamának rovására.

Az újítás mellett és a hegesztés ellen szólnak azon ismeretek is, miszerint a hegesztéssel kialakított kötés környezete könnyen és gyakran hamar korrodálódik [1–3], továbbá hegesztés során a hőhatásövezetben a szemcseméret eldurvulhat, s ezáltal romlanak az anyag mechanikai tulajdonságai [4]. Az ez ellen való kíváncsi pedig – legfőképp biztonságossága és fenntarthatósága érdekében – alapvetéssé avanszált.

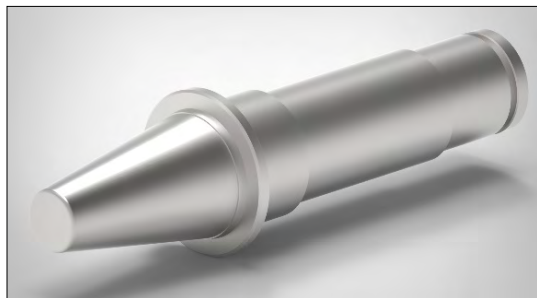
Ezeknek tudatában és a folyamatos piaci igények felmérése mentén – a '60-as évektől ismertté vált a T-Drill cég, mely csőmegmunkáló gépekkel és azok gyártásával foglalkozik – alkották meg a hidegalakítással történő mélyhúzási módszert. A modern hidegalakítással működő csőperemező technológia egy olyan műszaki eljárás, mely – szemben a hagyományos hegesztéses módszerrel – több mint 40%-kal csökkenti a gyártási időt és annak költségeit.

Ez a technológia minimálisra redukálja a hegesztés szükségességét, és minőségi ugrást jelent, főleg az élelmiszeriparban alkalmazott rendszerek esetében, mivel a csővezetékben szállított közeg már nem találkozik a szennyezőket tartalmazó varratgyökkel, és az ezzel elért minőség megfelel a higiéniai elvárásoknak.

E vívmány mentén felvetődött a kérdés: hogyan lehetne a csővek karimáját más módon kialakítani? A felmerülő kérdéskör megválaszolásával nagy technológiai újítást alkotott meg a T-Drill, azonban elsődlegesen könnyűfémek peremezése volt a feladata. Az újítás megfelelt egészen addig, amíg kis átmérővel, kis nyomásokkal kellett megbirkózni, ám ezzel párhuzamosan szükségessé vált a további kutatás és fejlesztés, mely a nagyobb átmérő- és nyomásértékeknek is (a színesfémekhez képest fenntarthatóbb) megfelelni képes acélcsővek peremezésének módjait vizsgálja és teszi lehetővé.

Mindezek mentén alakult ki a napjainkban ismeretes és világszerte elterjedt technológia: a hidegalakításos csőperemezés. Ennek elengedhetetlen eszköze és szerzőszáma a csőperemező gép, melynek fontos része a csőperemező szerzőszám (1. ábra).

A peremezőszerzőszám használata során nyomó, koptató és hajlító igénybevételnek van kitéve, melyek csökkentik a szerzőszám élettartamát, ezáltal növelve a szerzőszámcsere gyakoriságát. Ez nemcsak több peremezőszerzőszámra való igényt jelent,



1. ábra. Csőperemező szerzőszám

hanem kihívást is támaszt a szerzőszámgyártóknak. E jegyek ismeretében választottuk a Böhler K110 és K340-es jelölésű szerzőszámacélokat.

Mindkét acélminőség ideális a kívánalmaknak való megfelelés és ár/érték arány tekintetében, ám a hőkezelések jelentősen befolyásolják az acélok szövetszerkezetét [5, 6] és ezáltal kopási viselkedését [7, 8]. Gavriljuk és társai [9] a mélyhűtés hatását vizsgálta a martenzítatalakulásra, Das és társai [10] a karbidkiválásokat tanulmányozta hasonló hidegalakító szerzőszámacéloknál. További kutatók [11, 12] a mechanikai tulajdonságok változásával, mások [13, 14] a mélyhűtés kopási tulajdonságokra gyakorolt hatásával foglalkoztak. Vizsgálatainkhoz először K110 és K340 anyagon nagy hőmérsékletű edzést és háromszori, nagy hőmérsékletű megeresztést alkalmaztunk, majd K340 anyagminőségű mintát nagy hőmérsékletű edzés, mélyhűtés és háromszori, nagy hőmérsékletű megeresztést követően is vizsgáltuk. Vizsgálataink Rockwell-keménységmérés, koptató- és Charpy-féle ütővizsgálat, valamint fénymikroszkopos szövetszerkezeti vizsgálat voltak.

2. Alkalmazott anyagok, eszközök és eljárások

A K110-es nagy szén- és krómtartalmú hidegalakító szerzőszámacél jó szívóssággal és – a karbidképzők jelenlétének hatására – kiváló kopásállósággal is jellemezhető. Ajánlott alapanyaga a hidegalakító hengerek szerzőszámainak. A Böhler K110-es minőség számjele 1.2379, acélminőségjele X153CrMoV12, AISI-jelölése D2.

A K340 Isodur olyan univerzális hidegalakító szerzőszámacél, mely jó nyomószilárdsággal, kopásállósággal és kiváló szívóssággal bír, valamint csekély a hőkezeléskori méretváltozása. Elektroszalagos átolvasztással gyártják, így nagy tisztaságú, valamint kedvező a dermedési struktúrája amellet, hogy a gyártási technológiájából eredően kismértékű a nemfémes zárvány jelenléte.

Azért választottuk ezeket a minőségeket, mivel az elérhető tulajdonságaik megfelelnek a szerszámunk anyagával szemben támasztott követelményeknek. A K110-es és K340-es próbatestünk összetételét az **1. táblázat** szemlélteti [4].

Az anyagok szállítási állapotában mért keménységek 210–220 HB között mozogtak, tehát jól forgácsolhatók. Rúd alapanyagainkból – forgásszimmetrikus gyártmányról lévén szó – esztergálással készítettünk peremezőszerszámokat. Hőkezeléshez IU72/1F 2RV 60×60×40 10 bar-os, CP Schmetz-típusú vákuumkemencét használtunk, amelynek üzemi hőmérséklet-tartománya –150°C-tól 1300 °C-ig terjed, így ezzel végeztük el az edzést, a mélyhűtést és a megeresztést is (**2. ábra**).

A K340-es minőség esetében kétféle hőkezelési technológiát alkalmaztunk. Első esetben nagy hőmérsékletről (1060 °C) edzést és háromszori, nagy hőmérsékletű megeresztést (545, 555, 535°C), második esetben az edzést követően folyékony nitrogénnel történő mélyhűtést (–150 °C) alkalmaztunk, amit háromszori, nagy hőmérsékletű megeresztés (545, 555, 535 °C) követett. A mélyhűtés alkalmazása mellett azért döntöttünk, mivel ezzel az eljárással csökkenthető szinte nullára a maradék ausztenit mennyisége, mely ellenkező esetben jelenlétével káros hatást gyakorol az anyagra, ugyanis inhomogenitást és feszültségeket okoz. A mélyhűtéssel készült szerszám hőkezelését a **3. ábra** szemlélteti.

A K110-es szerszámacél hőkezelésének menetét a **4. ábra** szemlélteti.

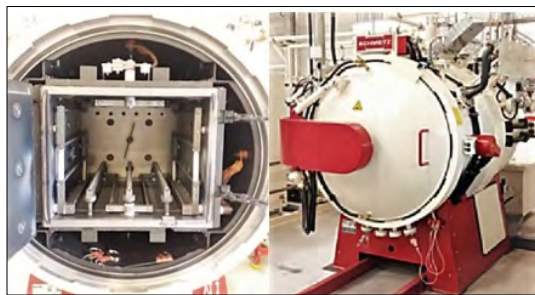
3. Mérési eredmények

A hőkezelések után keménységméréseket végeztünk egy Ernst AT-130 keménységmérő berendezéssel, aztán kész méretre köszörültük a szerszámokat. A roncsolásos vizsgálatra szánt próbatestekből kimunkáltuk a koptatóvizsgálathoz szükséges mintákat. A koptatóberendezés képe az **5. ábrán** látható.

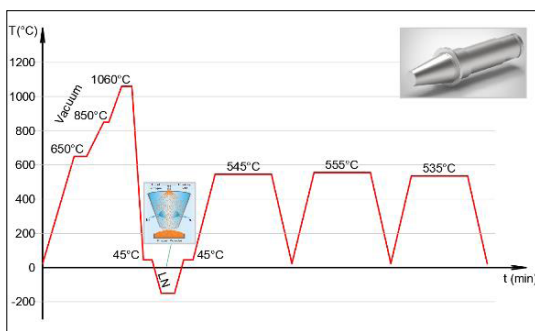
A vizsgálat során 20 mm átmérőjű, alumínium-oxid anyagú, polírozott felületű kerámiagolyókat alkalmaztunk. A mérések időtartama 10 perc, a fordulatszám 570 fordulat/perc volt minden esetben.

1. táblázat. A K110 és a K340 jelű acélok vegyi összetétele

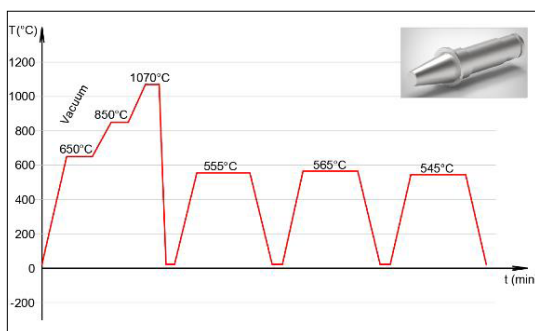
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
K110	1,55	0,30	0,30	11,30	0,75	0,75
K340	1,10	0,90	0,40	8,30	2,1	0,5



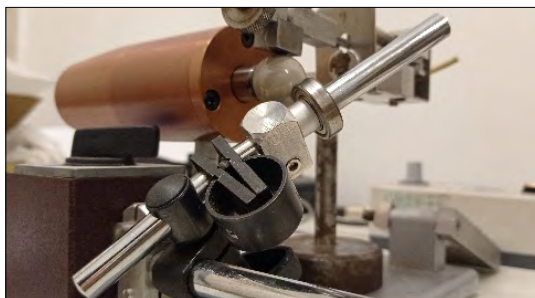
2. ábra. Vákuumos hőkezelő kemence



3. ábra. A K340-es mélyhűtött szerszám hőkezelési diagramja



4. ábra. A K110-es szerszámacél hőkezelési diagramja



5. ábra. A koptatóberendezés

A koptatott lenyomatok átmérőit Olympus DSX1000 mikroszkóppal mértük meg. A 6. ábrán egy koptatott darab fényképe látható.

A kopás mérőszámaként a kopási tényezőt (K) vettük, mely a terhelőerő (N), kopási térfogat (V_v) és a kopási úthossz (S) ismeretében számítható. A számításokat az alábbi képletek alapján végeztük.

$$K = \frac{V_v}{S \cdot N}, \quad (1)$$

ahol a kopási térfogat a gömbsüveg mélységéből (h) és a kopásnyom átmérőjéből vezethető le (2).

$$V_v = \frac{h \cdot \pi}{6} \left(\frac{3}{4} d^2 + h^2 \right), (mm^3) \quad (2)$$

A létrejött gömbsüveg mélységét a koptatógolyó sugarából (R) és a kopási lenyomat átmérőjéből ($d = 2R$) számítjuk (3).

$$h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}, \quad (mm) \quad (3)$$

Továbbá a kopási úthossz meghatározható a koptatógömb sugarának és annak fordulatszámának (n) ismeretében (4)

$$S = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R \cdot t, (m) \quad (4)$$

A mért értékek alapján megállapítható, hogy a leginkább kopásálló minőségnek a K340 mélyhűtéssel hőkezelt bizonyult. A keménységmérési eredményeket és a kapott kopási tényezőket a 2. táblázatban foglaltuk össze.

A különböző hőkezeltségű minták kopási tényezőit a 7. ábra szemlélteti.

A kopás feltehetőleg a szövetszerkezettel áll összefüggésben. A szövetszerkezeti vizsgálatok érdekében a mintákat műgyantába ágyaztuk, csiszoltuk, políroztuk, majd 2%-os Nitallal maratunk, végül Neophot 2-es mikroszkóp segítségével vizsgáltuk.

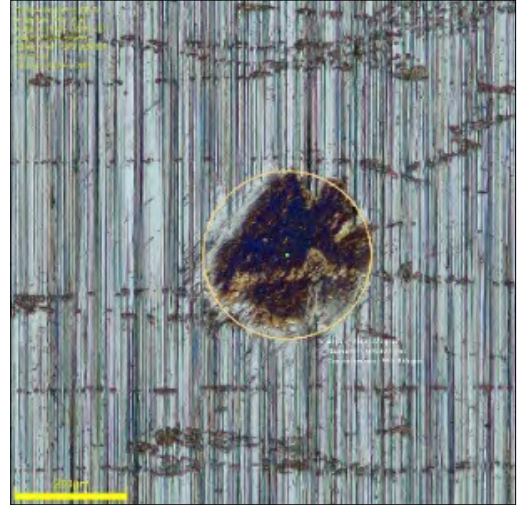
Mivel a Nital a karbidokat sem és az ausztenitet sem marja, különböző nagyításokban vizsgálható volt a szerszámacélokban jelen lévő karbidok megjelenési formája, azok eloszlása, illetve a karbidokat körülölelő mátrix jellegzetessége.

Relatívén kis nagyításban vizsgálva a mintákat a K110 acél karbidhálós struktúrát mutat (8. ábra), miközben a K340-es minőségénél ez annyira jellemző, mivel ezt az acélt elektroszalagos átolvasztással gyártották.

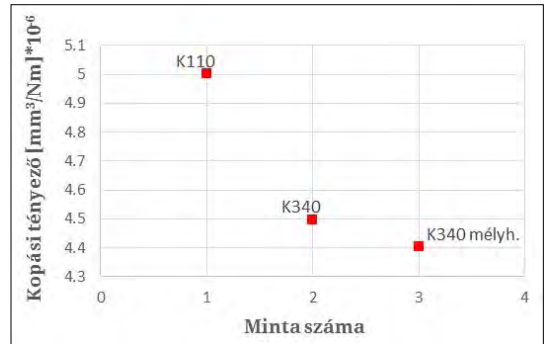
Mindegyik anyagnál jellemzően kissé nagyobb méretű, töredezett karbidokat láthatunk az eredeti szemcsehatárokon (8. ábra), míg a mátrixban már jóval finomabbak és legömbölyödöttek a karbidok. Mindegyik acélnál a szemcsék mérete

2. táblázat. Mérési eredmények

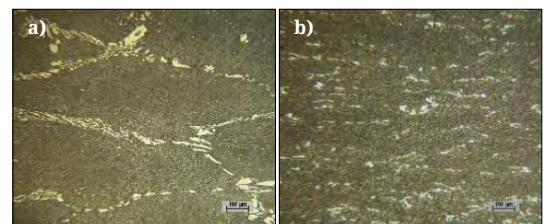
Minta	Keménység, HRC	Kopási tényező (K) (mm ³ /Nm)
K110	60	05,00E-08
K340	59	04,49E-08
K340 mélyhűtött	60	04,40E-08



6. ábra. A koptatás során létrejött lenyomat



7. ábra. A vizsgált minták kopási tényezői



8. ábra. Az acélok karbideloszlása Nital 2%, a) K110, b) K340 acél

20 μm körüli. A K110 acél mátrixában pálcikaszerű karbidok mellett finom, gömbszerű karbidokat is láthatunk, míg a K340 acél mátrixában jellemzően gömbszerűen jelennek meg a karbidok (9. ábra).

A fénymikroszkópos vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy 1060 °C-on ausztenitesítve a K340 acélmintát és hagyományos körülmény között hűtve, majd háromszor megeresztve, a finom szerkezetű mátrixban fellelhető még a maradék ausztenit, míg ha az edzés mélyhűtéssel végződött és ezt követte a háromszoros megeresztés, 1000-szeres nagyításban nem mutatható ki maradék ausztenit (10. ábra). A felvételeken jól látható, hogy a nem maradó karbidok gömbszerűek, míg a megeresztett martenzit között még fellelhető maradék ausztenit a nem mélyhűtött mintánál szögletes.

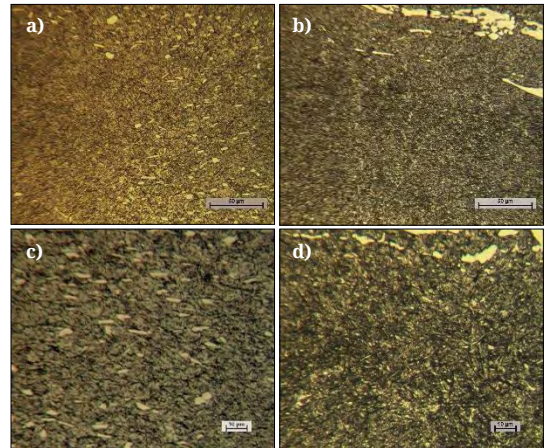
4. Következtetés

A K110-nek jók a kopási tulajdonságai és a keménysége, viszont a mikroszkópos szövetszerkezeti vizsgálat azt bizonyítja, hogy karbidhálós a szerkezete, míg az átolvasztott anyagnál ez nem jellemző. A K340-es acélnál az elektrosalakos átolvasztás eredményeképp szövetszerkezetében homogénebb, finomabb és egyenletesebb karbideloszlást láthatunk. A K340-es, mélyhűtött minta szövetszerkezetében jellemzően a maradék ausztenit nem lelhető fel, így a darabunkban a hőkezelés utáni méretváltozás nem feltételezhető, és élettartama várhatóan meghaladja az előző két mintadarabét. A mélyhűtött és háromszor megeresztett K340-es acél kopással szembeni legjobb ellenállása a homogén karbideloszlásnak és a teljesen átalakult szövetszerkezetnek köszönhető.

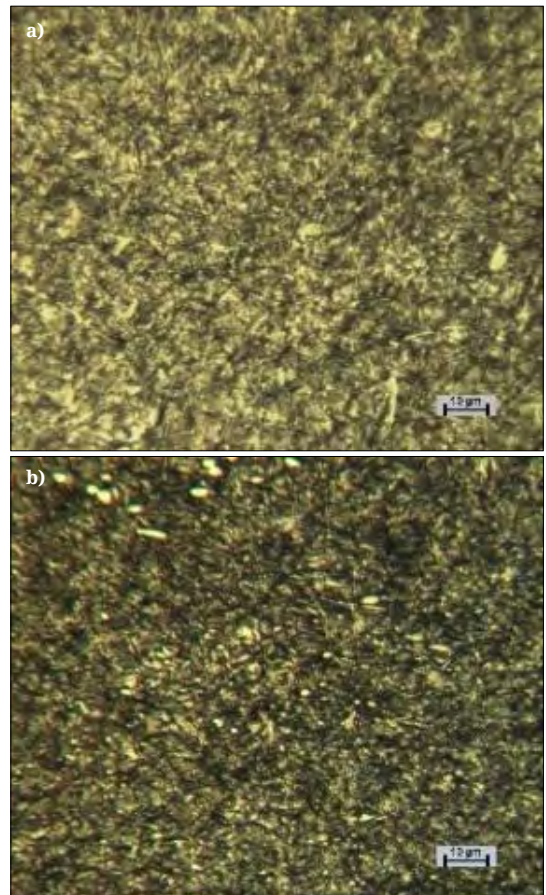
Tehát az általunk választott csőperemező szerszám alapanyagának a nagy hőmérsékletéről nitrogén védőgázban edzett, mélyhűtött és háromszor nagy hőmérsékleten megeresztett, K340-es anyagminőségű szerszámacél tűnik a legmegfelelőbbnek. Remélhetőleg a gyakorlati tapasztalat is ezt támasztja majd alá.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak a Magyar Államnak és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak a támogatásért a TÉT-2019-00093. számú projekt megvalósításában, valamint az Európai Uniónak a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00081. számú projekt támogatásáért.



9. ábra. A mátrix jellegzetessége hasonlóan hőkezelt acélokénál. Nital 2%
a) K110, b) K340, c) K110, d) K340 acél



10. ábra. Maradék ausztenit a K340 acélok mátrixában; a) hagyományosan hőkezelt minta, b) mélyhűtéssel hőkezelt minta

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Fábíán E. R., Kuti J., Gáti J., Tóth L.: *Corrosion Behavior of Welded Joints in Different Stainless Steels*. Revista De Chimie, 2020. 440–449. <https://doi.org/10.37358/RC.20.3.8018>
- [2] Kovács T., Pinke P., Széll K.: *Vékony lemezek hegesztés technológiájának tervezése/Welding Processes Specification of thin Sheets*. Abstracts Book of 10th International Engineering Symposium at Bánki, 2018. 51.
- [3] Dadfar M., Fathi M.H., Karimzadeh F., Dadfar M. R., Saatchi A.: *Effect of TIG welding on corrosion behavior of 316L stainless steel*. Materials Letters, 61. (2007) 2343–2346.
- [4] Kovács-Coskun T., Pinke P., Bitay E.: *A szemcseméret és a mechanikai tulajdonságok kapcsolatának vizsgálata hegesztett varratoknál*. Műszaki Tudományos Közlemények, 1. (2014) 125–130. <https://doi.org/10.33895/mtk-2014.01.11>
- [5] Tóth L., Fábíán E. R., Huszák Cs.: *Heat treatment Effects on Properties of K110 Böhler Steel*. Abstracts Book of 10th International Engineering Symposium at Bánki, 2018. 85.
- [6] Tóth L., Uri Szabó D.: *A mélyhűtés hatásai a szerzőmacélok tulajdonságaira/The effects of the cryogenic treatment on the tool steel properties*. XXIX. Hőkezelő és Anyagtudomány a gépgyártásban Konferencia, 2020. 1–7.
- [7] Fábíán E. R., Tóth L., Huszák Cs.: *Examination of Heat Treatment on the Microstructure and Wear of Tool Steels*. Acta Materialia Transylvanica, 2/2. (2019) 87–92. <https://doi.org/10.33924/amt-2019-02-04>
- [8] Kovács T. A., Mhatre U., Nyikes Z., Bitay E.: *Surface Modification Innovation for Wear Resistance Increasing*. Iop Conference Series: Materials Science and Engineering, (2019) 613. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/613/1/012039>
- [9] Gavriljuk V. G., Theisen W., Sirosh V. V.: *Low-temperature martensitic transformation in tool steels in relation to their deep cryogenic treatment*. Acta Materialia, 61. (2013) 1705–1715. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.045>
- [10] Das D., Dutta A. K., Toppo V., Ray K. K.: *Effect of deep cryogenic treatment on the carbide precipitation and tribological behaviour of D2 steel*. Materials Manufacturing Process, 22. (2007) 474–480. <https://doi.org/10.1080/10426910701235934>
- [11] Molinari A., Pellizzari M., Gialanella S., Straffellini G., Stiasny K. H.: *Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels*. Journal of Materials Processing Technology, 118/1–3. (2001) 350–355. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(01\)00973-6](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(01)00973-6)
- [12] Das D., Sarkar R., Dutta A. K., Ray K. K.: *Influence of sub-zero treatments on fracture toughness of AISI D2 steel*. Materials Science and Engineering A, 528/2. (2010) 589–603. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.057>
- [13] Das D., Dutta A. K., Ray K. K.: *Sub-zero treatments of AISI D2 steel: part II. Wear behavior*. Materials Science and Engineering A, 527/9. (2010) 2194–2206. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.10.071>
- [14] Kumar S.; Nagaraj M., Khedkar N. K., Bongale A.: *Influence of deep cryogenic treatment on dry sliding wear behaviour of AISI D3 die steel*. Materials Research Express, 5/11. (2018) 116525, 1–9. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aadeba>

Lézerrel létrehozott periodikus felületi struktúrák (LIPSS) alkalmazásorientált felhasználása

Application-oriented use of Laser-induced Periodic Surface Structures

Windisch Márk,¹ Maloveczky Anna,² Aradi László,³ Veres Miklós,⁴ Fürjes Péter,⁵ Vida Ádám⁶

¹ Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Budapest, Magyarország és Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar, Anyagfizikai Tanszék, Budapest, Magyarország, mark.windisch@bayzoltan.hu

² Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. Budapest, Magyarország, anna.maloveczky@bayzoltan.hu

³ Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar, Litoszféra Fluidum Kutató Laboratórium, Kőzettani és Geokémiai Tanszék, Budapest, Magyarország, aradi.laszloelod@ttk.elte.hu

⁴ Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest, Magyarország, veres.miklos@wigner.hu

⁵ Energiatudományi Kutatóközpont, MFA Mikrorendszerek Laboratórium, Budapest, Magyarország, furjes@ek-cer.hu

⁶ Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., Budapest, Magyarország, adam.vida@bayzoltan.hu

Abstract

This paper investigates the phenomenon of Laser-induced Periodic Surface Structures (LIPSS) on Si single crystals. As usual, by variation of parameters, the morphological and physical properties of the resulting surfaces can be tailored, with respect to their use in many applications. One application-oriented use of LIPSS is the preparation of SERS (Surface Enhanced Raman Spectroscopy) substrates, which can be used to detect extremely low concentrations of molecules. In this experimental work, a possible way of manufacturing of SERS substrates, followed by SERS enhancement testing has been shown.

Keywords: LIPSS, Raman scattering, femtosecond laser, surface treatment, SERS enhancement.

Összefoglalás

A lézeres kezelés által létrehozott periodikus felületi struktúrákat röviden LIPSS-eknek (laser-induced periodic surface structures) nevezzük. A lézeres felületkezelés során végbemenő fizikai folyamatok szabályozásával a kialakított felületek morfológiai és fizikai tulajdonságai beállíthatók, ennek megfelelően azok számos felhasználási lehetőséggel bírnak. A LIPSS egyik alkalmazásorientált felhasználása a felületerősített Raman-spektroszkópiában (SERS) alkalmazott SERS-hordozók, melyek segítségével molekulák extrém kis koncentrációja is kimutatható. A kísérleti munka során femtoszekundumos lézerberendezés segítségével SERS-hordozót készítettünk, melynek SERS-erősítését vizsgáltuk.

Kulcsszavak: LIPSS, Raman-szórás, femtoszekundumos lézer, felületkezelés, SERS-erősítés.

1. Bevezetés

1.1. A LIPSS-ről

A lézeres felületi megmunkálás által kialakított mikro- és nanométeres nagyságrendbe eső, periodikus felületi struktúrákat röviden LIPSS-ek-

nek (laser-induced periodic surface structures) nevezzük [1]. A LIPSS-ek fémek, félvezetők és elektromosan nem vezető anyagok felszínén a lézernyaláb és az anyag kölcsönhatása következményeként kialakult morfológiai változások,

melyek mind folytonos, mind impulzusüzemű lézerrel végzett besugárzás hatására létrejönnek. A kialakult LIPSS-ek fizikai tulajdonságait a lézeres besugárzás több paramétere, úgymint a lézersugárzás hullámhossza, energiasűrűsége, impulzus időtartama és energiája együttesen befolyásolja. A létrehozott LIPSS-ek tulajdonságait a besugárzás körülményei mellett a besugárzott anyag szabadelektron-sűrűsége, kezdeti felületi érdessége és anyagszerkezete, illetve az alkalmazott közeg fizikai és kémiai tulajdonságai is jelentősen befolyásolhatják [2].

A kialakított LIPSS-eknek, a módosított felületi és anyagszerkezeti tulajdonságaiknak megfelelően különböző mechanikai és optikai tulajdonságai lehetnek, melyek számos ipari alkalmazást elősegítenek. A LIPSS-ek egyik tribológiai alkalmazása a különböző acél felületek kopási tulajdonságainak szabályozott módosítása, melynek segítségével mikroméretű alkatrészek élettartama növelhető [3]. A LIPSS-ek egy másik alkalmazási lehetősége a felületek optikai rácsként való felhasználása, mellyel a félvezetőiparban alkalmazott mérőberendezések elemeinek optikai tulajdonságai módosíthatók [4]. A LIPSS-ek egyik orvosbiológiai alkalmazása a titánalapú implantátumok felületi strukturálása. A LIPSS-ekkel borított felszín segítheti a sejtek megtapadását és növekedését, ennek következtében felgyorsul az implantátum szervezetbe történő beépülése, továbbá növekszik annak élettartama [5].

A LIPSS-ek további felhasználása a felületerősített Raman-spektroszkópiában (SERS) használt, úgynevezett SERS-hordozók kialakítása, melyek felülete a lokalizált plazmonrezonancia következtében a vizsgált molekulák Raman-jelének jelentős erősítését eredményezi [6].

1.2. Felületerősített Raman-spektroszkópia

A SERS a Raman-spektroszkópia kiegészítő mérési technikája. A felületerősített Raman-spektroszkópiai mérések során az adott molekulát adszorbeáljuk a SERS-aktív felszínre, majd vizsgáljuk annak Raman-spektrumát, ami jellemző az adott molekulára. A SERS erősítésének magyarázatát a kémiai és az elektromágneses kölcsönhatáson alapuló mechanizmusok írják le. Az előbbi hatás csak kismértékben befolyásolja az erősítést, így főként az elektromágneses elméletet szokták tárgyalni. Az elektromágneses mechanizmus szerint a vizsgált fényvel való besugárzás hatására felületi plazmonok gerjesztődnek, ami a felületi részecskék közötti elektromos télerősség növekedéséhez vezet, mely a vizsgálandó molekulák által

kibocsátott Raman-szórás intenzitását lényegesen megnöveli. Az elmélet alapján a Raman-jelek erősítése a felületi részecskék méretének, alakjának, illetve a köztük lévő távolság optimalizálásával növelhető.

A SERS-hordozók készítése többféle előállítási technikával történhet: pl. a plazmonikus anyag felszínének érdesítésével vagy egy strukturált hordozó felszínének plazmonikus anyaggal (pl.: arany, ezüst) történő bevonása által. A kísérleti munka célja az utóbbi technika segítségével létrehozott SERS-hordozó készítése volt [7].

2. Vizsgálati módszerek

A kísérleti munka során a SERS-hordozó alapanyagaként 4 inch átmérőjű, polírozott, p-típusú Si(111) lapkát használtunk. A lézeres felületkezelést 254 mm fókusztávolságú F-theta lencsével felszerelt, Coherent gyártmányú, Monaco típusú, 1035 nm hullámhosszú, 277 fs impulzus időtartamú Nd:YAG lézerberendezéssel végeztük. A strukturált szilícium felszínét elektronikai tisztaságú térben AJA Orion vákuumgőzölővel, 10^{-9} Pa nyomáson aranyréteggel vontuk be. Az elkészített SERS-hordozó felszínét 4. generációs TESCAN VEGA volfrámkatódos pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk. A hordozók SERS-erősítését standard próbaként gyakran használt 4-aminotiofenol (4-ATP) vizes oldatával vizsgáltuk. A méréseket Horiba LabRAM HR800 Raman-mikrospektroszkóp segítségével 633 nm hullámhosszú, 1 mW lézerteljesítményű lézernyalábbal végeztük, melyet Olympus BXFM mikroszkóp 50× nagyítással, 0,6 numerikus apertúrájú objektívvel fókuszáltuk a minta felületére.

3. Kísérleti munka

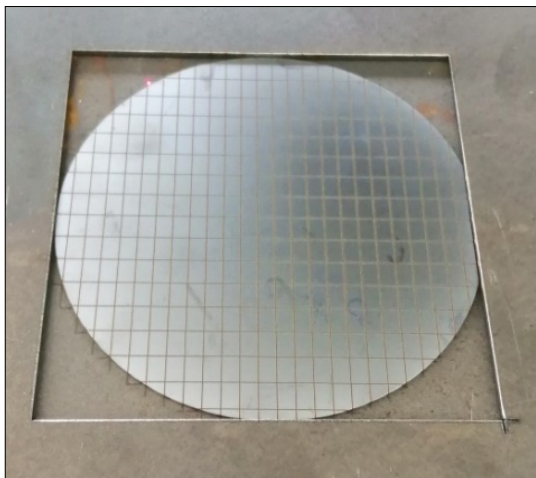
3.1. A SERS-hordozó elkészítése

A SERS-hordozó készítését a 6×4 mm végső hordozóméret elérésének céljából a szilíciumlapka hátoldalának lézeres irdalásával kezdtük (1. ábra).

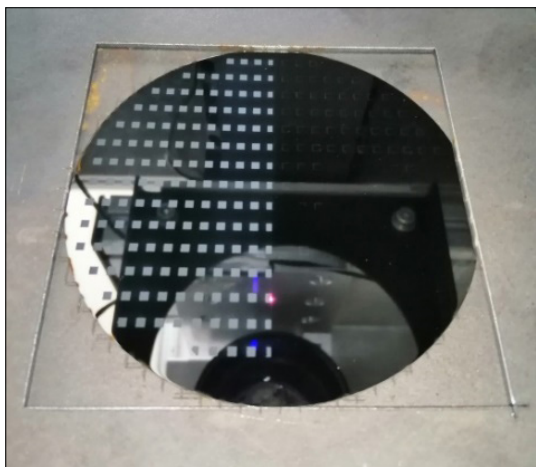
A szilíciumlapka későbbi könnyebb törése miatt az irdalás során a lézeres besugárzásánál wobbling technikát, a megfelelő hőelvezetés biztosítása érdekében a lapka alatt elhelyezkedő másik szilíciumlapkát használtunk.

A szilíciumlapka irdalását követően a kijelölt hordozók polírozott oldalának közepére szintén femtoszekundumos lézerberendezés segítségével 2×2 mm-es strukturált területeket hoztunk létre (2. ábra).

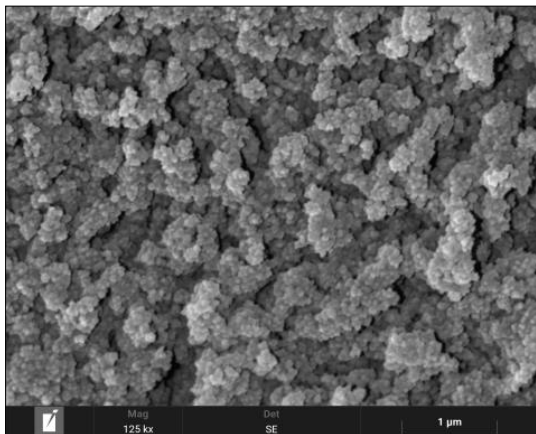
A lézeres besugárzás 1 MHz ismétlési frekvenciával, 6,6 μJ impulzusenergiával és 10 mm/s pász-



1. ábra. A szilíciumlapka hátoldala lézeres irdalást követően



2. ábra. A szilíciumlapka felszíne a lézeres felületi strukturálás során



3. ábra. Az aranyréteggel bevont, strukturált szilícium felszíne

tázási sebességgel, 3-szoros átlapolás mellett, légköri nyomáson történt.

A felületi strukturálást követően a szilíciumlapkát vákuumgőzölő segítségével 80 nm vastag aranyréteggel vontuk be, a tapadást segítő, 5 nm vastag titánréteg alkalmazásával (3. ábra).

Az aranyozást követően az irdalás mentén optikai papír segítségével 6×4 mm-es darabokra törtük a szilíciumlapkát.

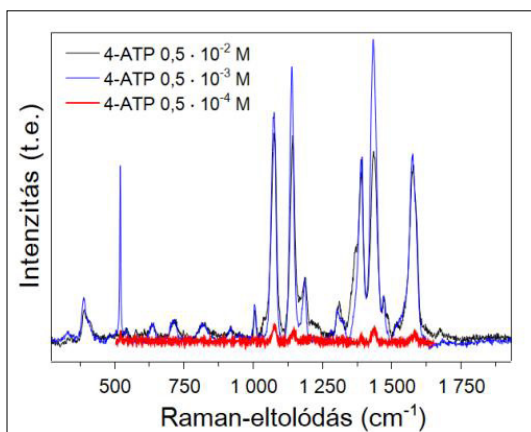
3.2. A hordozó SERS-erősítésének vizsgálata

Az elkészített hordozó SERS-erősítését 4-aminotiofenol (4-ATP) oldat segítségével vizsgáltuk.

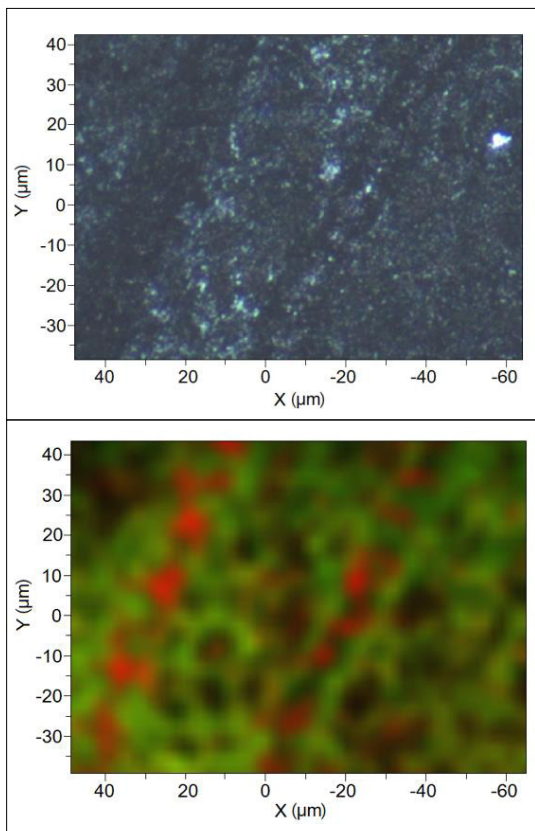
A mérések reprezentatív, háttérkorrigált spektrumai a 4. ábrán láthatók. A SERS-hordozók aktív felületére 3 μL oldatot cseppentettünk, majd az oldószer elpárolgását követően vizsgáltunk. A kiindulási $0,5 \times 10^{-2}$ M-os törzsoldatot három nagyságrendig hígítva végeztünk méréseket. A $0,5 \times 10^{-4}$ M koncentrációjú oldatig kaptunk értékelhető spektrumot. A legkisebb koncentrációjú, $0,5 \times 10^{-5}$ M-os oldat már nem adott a 4-ATP-re jellemző spektrumot.

A 4-ATP törzsoldattal ($0,5 \times 10^{-2}$ M) cseppentett hordozón az oldószer elpárolgása után körülbelül $100 \times 110 \mu\text{m}$ -es területet térképeztünk le 2 μm -es lépésközt használva.

Az 5. ábrán látható térképeken pirossal a Si fő sávjának (521 cm^{-1} -nél mért) integrált intenzitását, zölddel a 4-ATP legintenzívebb sávjainak ($1050\text{--}1600 \text{ cm}^{-1}$ között lévő) integrált intenzitását ábrázoltuk. A térképen megfigyelhető két átlós sávban intenzívebb a Si sávjá, a 4-ATP legintenzívebb erősítései kb. 10 μm átmérőjű, gyűrűszerűen megjelenő foltok szélén jelentkeznek, melyek a lézeres kezelésnél alkalmazott átlapolás követke-



4. ábra. Különböző koncentrációjú 4-ATP oldatok Raman-spektruma a készített SERS-hordozón



5. ábra. A SERS-hordozó 4-ATP törzsoldattal mért Raman-térképezése: a vizsgált terület optikai mikroszkópos képe (fenti ábra), Si (piros) és 4-ATP (zöld) jeleinek Raman-intenzitásait szemléltető térkép (lenti ábra)

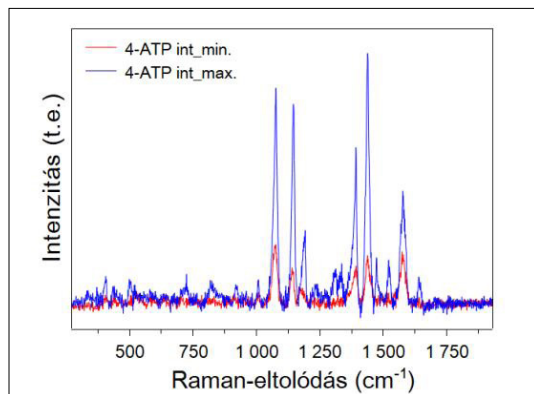
zében 10 μm -enként ismétlődő morfológiai egységekre utalnak.

A **6. ábrán** a minimum és maximum intenzitások között körülbelül 3,5–5-szörös (sávtól függően változó) különbség figyelhető meg a 4-ATP erősített sávjain. A különbséget okozhatja a hordozó morfológiája, mivel a térképezés során egy fókusz síkban történtek a mérések.

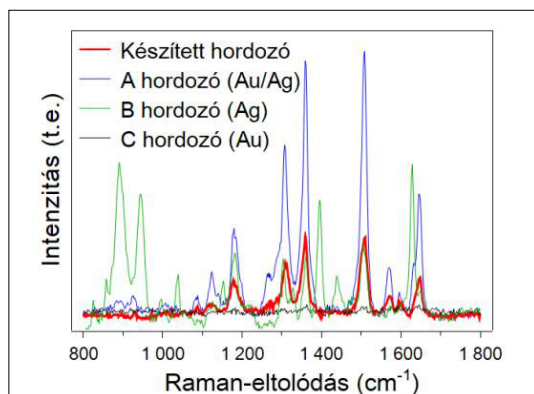
4. Termékfejlesztés

A hordozó SERS-erősítésének további vizsgálatára 10^{-5} M koncentrációjú Rodamin 6G oldattal végeztünk méréseket. A vizsgálatok során, azonos mérési körülmények mellett, a készített hordozó SERS-erősítését a piacon beszerezhető hordozókéval hasonlítottuk össze [8].

A **7. ábrán** bemutatott összehasonlítás alapján a készített hordozó SERS-erősítése egy nagyságren-



6. ábra. Az 5. ábrán bemutatott Raman-térkép 4-ATP erősített sávjain integrált minimum és maximum spektrumok



7. ábra. A készített hordozó piacon lévő termékek SERS-erősítésének összehasonlítása

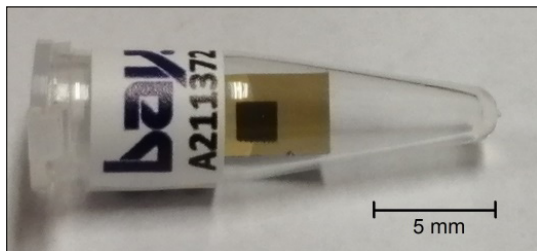
den belül van a piacvezető cégek arany- és ezüst-alapú SERS-hordozójához képest.

A hordozó SERS-erősítésének vizsgálata során kapott előremutató eredmények alapján termékfejlesztésbe kezdtünk.

A SERS-hordozókat a **8. ábrán** látott módon felmatricázott PCR-csőbe helyeztük. A becsomagolt SERS-hordozókat levákuumozott műanyag tasakba helyeztük, melyhez használati utasítást téve papírdobozba csomagoltuk (**9. ábra**).

5. Összefoglalás

A LIPSS-ek számos, alkalmazásorientált felhasználási lehetőséggel bírnak. A kísérleti munka során femtoszekundumos, impulzusüzemű lézer segítségével az egyik alkalmazási területhez kapcsolódóan a felületerősített Raman-spektroszkópiában alkalmazott SERS-hordozó előállítását tűztük ki célul.



8. ábra. Az elkészített SERS-hordozó



9. ábra. A SERS-hordozóból készült termék

A készített hordozó SERS-erősítésének vizsgálatát 4-ATP és Rodamin 6G molekula segítségével vizsgáltuk. A Raman-mérések során a hordozó SERS-erősítését összehasonlítottuk piacon kapható termékekével. A kapott eredmények alapján a készített SERS-hordozó erősítése megközelíti a piacvezető termékek érzékenységet.

A mért eredmények alapján az elkészült prototípus SERS-hordozó termékfejlesztését kezdtük meg.

Köszönetnyilvánítás

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

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Van Driel H. M., Sipe J. E., Young J. F.: *Laser-induced periodic surface structure on solids: A universal phenomenon*. Physical Review Letters, 49. (1982) 1955–1958.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1955>
- [2] Bonse J., Krüger J.: *Femtosecond laser-induced periodic surface structures*. Journal of Laser Applications, 24. (2012) 042006.
<https://doi.org/10.2351/1.4712658>
- [3] Bonse J., Koter R., Hartelt M., Spaltmann D., Pentzien S., Höhm S., Rosenfeld A., Krüger J.:

Tribological performance of femtosecond laser-induced periodic surface structures on titanium and a high toughness bearing steel. Applied Surface Science, 336. (2015) 21–27.

<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.08.111>

- [4] Dusser B., Sagan Z., Soder H., Faure N., Colombier J. P., Jourlin M., Audouard E.: *Controlled nanostructures formation by ultra fast laser pulses for colour marking*. Optics Express, 18/3. (2010) 2913–2924.
<https://doi.org/10.1364/OE.18.002913>
- [5] Shinonaga T., Tsukamoto M., Kawa T., Chen P., Nagai A., Hanawa T.: *Formation of periodic nanostructures using a femtosecond laser to control cell spreading on titanium*. Applied Physics B, 119. (2015) 493–496.
<https://doi.org/10.1007/s00340-015-6082-4>
- [6] Bonse J., Höhm S., Kirner S. V., Rosenfeld A., Krüger J.: *Laser-Induced Periodic Surface Structures*. A Scientific Evergreen. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 23/3. (2017)
<https://doi.org/10.1109/JSTQE.2016.2614183>
- [7] Le Ru E., Etchegoin P.: *Principles of Surface-Enhanced Raman Spectroscopy: and related plasmonic effects*. Elsevier, 2008.
- [8] Windisch M. és társai: *Femtosekundumos lézernel Si egykristályon kialakított mikro- és nanostruktúrák vizsgálata*. Országos Anyagtudományi Konferencia poszter szekció rövid előadással, 2021.