

# ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA

ANYAGTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK



2. ÉVF.  
2019. 2.

# ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA

Anyagtudományi Közlemények

2. évfolyam, 2019. 2. szám



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET  
Kolozsvár  
2019

A folyóirat megjelenését támogatta a Magyar Tudományos Akadémia, a Bethlen Gábor Alapkezelő Zrt. és az EME Műszaki Tudományok Szakosztálya / The publication of this magazine was supported by the Hungarian Academy of Sciences, by the Bethlen Gábor Fund 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. Czifágy Tibor, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Magyarország  
 Prof. Diószegi Attila, Jönköping University, Jönköping, Svédország  
 Dobránszky János, MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapest, Magyarország  
 Prof. Dusza János, Institute of Materials Research of Slovak Academy of Sciences, Kassa, Szlovákia  
 Prof. Gyenge Csaba, Technical University of Cluj-Napoca, Kolozsvár, Románia  
 Prof. emer. Gyulai József, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Magyarország  
 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

**Lapszámszerkesztők / Editorial Board:**

Dobránszky János, MTA–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

**Felélős kiadó / Responsible publisher:** Biró Annamária

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

**Műszaki szerkesztő / DTP:** Szilágyi Júlia

**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 2019

**ISSN 2601-1883, ISSN-L 2601-1883**

**DOI: 10.33923/amt-2019-02**

**Online elérhető / online available at:** <https://eda.eme.ro/handle/10598/30356>

**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>

*Acta Materialia Transylvanica. Anyagtudományi Közlemények* az Erdélyi Múzeum-Egyesület (EME) Műszaki Tudományok Szakosztályának folyóirata, amely az anyagtudományok területéről közöl 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

---

BIRÓ László Péter, KERTÉSZ Krisztián, PISZTER Gábor, HORVÁTH Zsolt Endre, BÁLINT Zsolt .....	69
<i>Anyagtudósok kalandozása a biológiában: A lepkék szárnyainak szerkezeti színei</i>	
<i>Roaming of Materials Scientists in Biology: Structural Colours of Butterfly Wings</i>	
ASZTALOS Lilla, HORICSÁNYI Krisztina .....	73
<i>Hatóanyag-kibocsátó koszorúérsztentek bevonatának vizsgálata</i>	
<i>Examination of Coating of Drug-Eluting Coronary Stents</i>	
BITAY Enikő, MÁRTON László, TALPAS János .....	79
<i>A csikmadarasi vasgyártásból visszamaradt leletek anyagszerkezeti vizsgálata</i>	
<i>Microstructural Characterisation of Archeologic Finds Discovered at the Ironworks in Mádárás</i>	
FÁBIÁN Enikő Réka, TÓTH László, HUSZÁK Csenge .....	87
<i>A hőkezelés hatása a szerszámacélok szövetszerkezetére és kopási viselkedésére</i>	
<i>Examination of Heat Treatment on the Microstructure and Wear of Tool Steels</i>	
HALÁSZ Gergely, FÁBIÁN Enikő Réka, KUTI János .....	93
<i>Auszténites korrózióálló acélok lézersugaras vágása</i>	
<i>Laser Cutting of Austenitic Corrosion-Resisting Steels</i>	
HORVÁTH Richárd, STADLER Róbert Gábor, ANDRÁSFALVY Kristóf .....	99
<i>Szénszállal erősített műanyag marásának vizsgálata</i>	
<i>Investigation of Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastic</i>	
KOVÁCS Tünde Anna, NYIKES Zoltán, FIGULI Lucia .....	105
<i>Kompozit anyag fejlesztése dinamikus igénybevételre</i>	
<i>Development of a Composite Material for Impact Load</i>	
LEVELES Borbála, KEMÉNY Alexandra, KATONA Bálint .....	110
<i>Edzett üveg dinamikus és nagy hőmérsékletű, kvázisztatikus vizsgálata</i>	
<i>Dynamic and high temperature quasi-static examination of tempered glass</i>	

MESZLÉNYI György, BITAY Enikő .....	115
<i>A fókuszált lézernyaláb keresztmetszeti jellemzőinek szerepe az impulzusos üzemű lézeres vágásnál</i>	
<i>Role of the Features of Focused Laser Beam in Pulsed Laser Cutting</i>	
UZONYI Sándor.....	121
<i>Additív gyártás alkalmazása a kovácsszerszám-javításban</i>	
<i>Application of Additive Manufacturing for the Repair of Forging Dies</i>	

# Anyagtudósok kalandozása a biológiában: A lepkék szárnyainak szerkezeti színei

## Roaming of Materials Scientists in Biology: Structural Colours of Butterfly Wings

Biró László Péter,<sup>1</sup> Kertész Krisztián,<sup>1</sup> Piszter Gábor,<sup>1</sup> Horváth Zsolt Endre,<sup>1</sup> Bálint Zsolt<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet, Energiatudományi Kutatóközpont, Magyar Tudományos Akadémia, Budapest, Magyarország, [biro.laszlo@energia.mta.hu](mailto:biro.laszlo@energia.mta.hu)

<sup>2</sup>Magyar Természettudományi Múzeum, Budapest, Magyarország, [balint.zsolt@nhmus.hu](mailto:balint.zsolt@nhmus.hu)

### Abstract

The photonic nanoarchitectures occurring in the wing scales of lycaenid butterflies were investigated by scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM) and UV-VIS spectroscopy. We found that the males of all the nine investigated species possess photonic nanoarchitectures built according to the same general “plan”, but each species exhibits species-specific features which results in species-specific colours reproduced generation by generation with a high degree of accuracy.

**Keywords:** butterfly wing scales, photonic nanoarchitecture, electron microscopy, UV-VIS spectroscopy.

### Összefoglalás

Pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM), transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) és UV-VIS spektroszkópiával vizsgáltuk a boglárkalepkék szárnypikkelyeiben előforduló fotonikus nanoarchitektúrákat. Megállapítottuk, hogy mind a kilenc megvizsgált faj hímjeinek azonos szerkezeti rendszer szerint felépülő fotonikus nanoarchitektúrájuk a szárnypikkelyeik, de minden egyes faj elégséges mértékű faji sajátosságokat mutat a fajspecifikus színek létrejöttéhez. Ezek a színek nagy pontossággal reprodukálódnak generációról generációra.

**Kulcsszavak:** lepkék szárnypikkelyei, fotonikus nanoarchitektúra, elektronmikroszkópia, UV-VIS spektroszkópia.

## 1. Bevezető a fotonikus nanoarchitektúrákról

### 1.1. A fizika felől nézve

A fizika mintegy harminc évvel ezelőtt fedezte fel, hogy a fényhullámok esetében is előidézhető a félvezetők esetében jól ismert tiltott sáv megjelenése [1, 2]. Ehhez az szükséges, hogy olyan kompozitot állítsunk elő, amely két eléggé eltérő törésmutatójú, átlátszó közegből épül fel, és a törésmutató értékei periodikusan váltakoznak a térben olyan skálán, amely összemérhető a kompozitban terjedni nem képes fény hullámhosszá-

val. Ez utóbbi feltételből adódik, hogy a látható fény tartományában a fent említett kompozit tulajdonképpen egy nanokompozit, azaz a törésmutató váltakozása tipikusan 100 nm-es skálán történik. Ha szigorúan értelmezzük a fenti feltételeket, akkor az azoknak megfelelően létrejövő nanoarchitektúra egy fotonikus kristály lesz, amelyben az adott hullámhosszúságú fény semmilyen irányban sem tud terjedni, ezért visszaverődik a fotonikus kristály felszínéről. Ha lazítunk a tökéletes rendezettség feltételén, a fotonikus tiltott sáv megmarad és spektrális helyzetét is megőrzi, azonban szélessége csökken, és a teljes tiltott sáv részleges tiltott sávvá alakulhat át [3].

## 1.2. A biológia felől nézve

A biológiai evolúció mintegy ötvenmillió évvel ezelőtt fedezte fel a fotonikus nanoarchitektúrákban rejlő lehetőségeket [4]. Azóta is számos élőlény alkalmazza ezt a színeképzési mechanizmust változatos biológiai funkciók megvalósítására. A legközismertebb példák a lepkék és a különféle bogarak között adódnak [5]. A lepkék esetében a kék és zöld színek leggyakrabban szerkezeti eredetűek, azaz fotonikus nanoarchitektúrákra vezethetők vissza. A kék szín és ennek különféle árnyalatai különösen alkalmasak a figyelem felkeltésére például egy mező zöld háttére előtt [6]. Az ilyen jellegű élőhelyen élő boglárkalepkék hímjei a kék különböző árnyalataiban pompáznak, míg a nőstények szárnyfelszíne rendszerint festékanyag (melanin) által színezett barna. Ez azt eredményezi, hogy a nőstények szárnyai hatékonyabban nyelik el a napsugárzást [7], és ez elősegíti a felmelegedésüket, ami hasznos a peték érleléséhez.

## 1.3. Az anyagtudomány felől nézve

Ha az anyagtudomány felől tekintjük a szerkezeti (fizikai) színeket előállító nanoarchitektúrákat, akkor az első tényező, amit ki kell emelnünk, az a kompozitot felépítő két átlátszó anyag törésmutatójának elégséges különbsége. Minél nagyobb ez a különbség, annál könnyebben alakul ki fotonikus tiltott sáv, ha a két összetevő megfelelő periodicitással váltogatja egymást. A lepkék – a jelen írás fókuszában található rovarok – esetében a két összetevő a kitin, amelynek törésmutatója  $n_1 = 1,56$  és a levegő, amelynek törésmutatója  $n_2 = 1$ . A kitin egy biológiai polimer, egy polisaccharid, amelynek képlete és tulajdonságai közel állnak a cellulóz, a papír alapanyagát képező anyag tulajdonságaihoz.

Az eddigiekből következik, hogy a kitint és a levegőt 100 nm-es skálán kell „összekevernünk” egymással ahhoz, hogy a keletkező nanokompozit szerkezeti szint hozzon létre.

Természetesen ennek az összekeverésnek különféle módzatai lehetségesek: a) a 100 nm-es skálát jóval meghaladó méretben tökéletesen periodikus összekeverés, amit fotonikus egykristálynak nevezünk [8]; b) mikrométeres skálán tökéletesen periodikus szemcsékből felépülő úgynevezett fotonikus polikristály, amelynek a szemcséi véletlenszerűen el vannak forgatva egymáshoz viszonyítva [8]; c) csak közelrendezettséget mutató, úgynevezett fotonikus amorf, amelynek építőelemei között csak rövid távon fedezhető fel

valamilyen rend, például az első szomszédok átlagosan ugyanakkora távolságra vannak egymástól [9]. Ez utóbbi esetre mutat példát az 1. ábra.

Jól megfigyelhető az 1. ábrán, hogy a pikkelyek szabályos sorokban helyezkednek el a lepkeszárnyon, azt az elrendezést idézve, ahogyan a cserepek borítják a háztetőt. Jellemző méreteik  $100 \times 50 \mu\text{m}^2$ , alakjuk pedig egy lapított zsákot idéz, amelynek vastagsága  $1 \mu\text{m}$ . Ez az a térfogat, amelyet kitölt a fotonikus nanoarchitektúra.



1. ábra. Hím Ikarusz boglárka (*Polyommatus icarus*) szárnyfelszínének fényképe balra, pikkelyeinek (jobbra fent) és a pikkelyekben található nanoarchitektúrának (jobbra lent) pásztázó elektronmikroszkópos felvétele

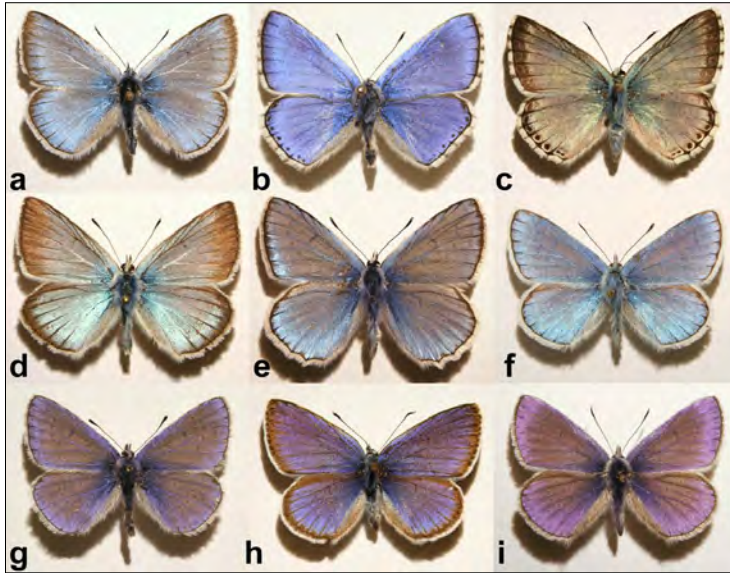
## 2. Szexuális jelzőszín

A boglárkalepke-félék körében igen gyakori az ivari kétalakúság, azaz a hímnek és a nősténynek teljesen más a megjelenési formája. A hímek szárnyfelszíne kékes árnyalatú, és ezt szerkezeti eredetű szín okozza (2. ábra [6]), míg a nőstények szárnyfelszíne pigment eredetű barna. Mindkét ivar szárny fonákján ugyanolyan, a fajra jellemző, de a fajok között sok hasonlóságot mutató bonyolult, ugyancsak pigment alapú pontmintázat található.

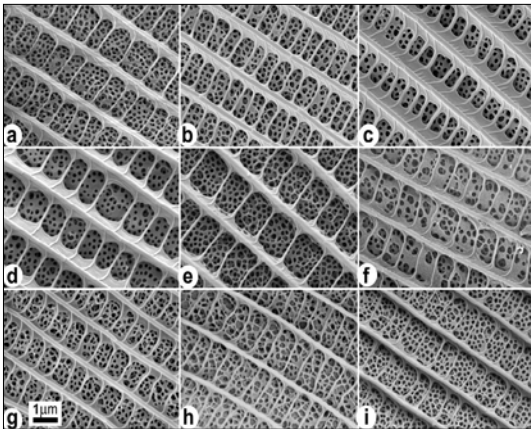
## 3. A színeket létrehozó nanoarchitektúrák

A fajra jellemző szexuális jelzőszíneket azonos elvek alapján felépülő, de mégis az egyes fajokra jellemző kialakítású nanoarchitektúrák hozták létre. Méretükből adódóan ezeknek a nanokompozitoknak a jellemzői csak elektronmikroszkópos módszerekkel tárhatók fel. Az egyes pikkelyek felszínéről pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) (3. ábra), míg a pikkelyek keresztmetszeti szerkezetéről transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) nyerhetők adatok (4. ábra). Ez utóbbi módszer alkalmazásához az szükséges, hogy a speciális polimerbe ágyazott lepkeszárnyból 70 nm vastagságú szeleteket vágjunk gyémánt ultramikrotom késsel.





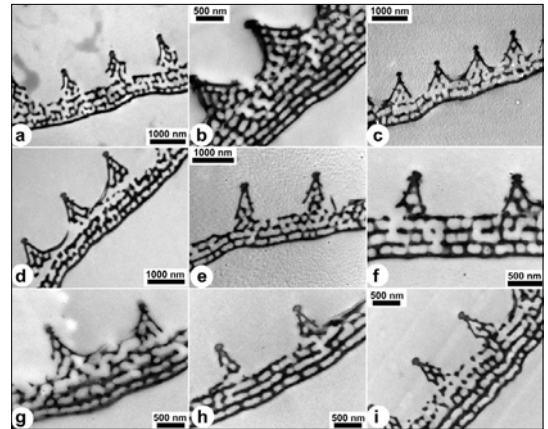
**2. ábra.** Kilenc, azonos élőhelyen előforduló közeli rokon boglárkafaj hímjeiről, azonos körülmények között, mesterséges fényben készült fényképek. a) *Polyommatus amandus*; b) *Polyommatus bellargus*; c) *Polyommatus coridon*; d) *Polyommatus damon*; e) *Polyommatus daphnis*; f) *Polyommatus dorylas*; g) *Polyommatus icarus*; h) *Polyommatus semiargus*; i) *Polyommatus thersites*



**3. ábra.** A 2. ábrán bemutatott kilenc lepkefaj hímjeinek jellemző pikkelyszerkezete SEM felvételeken. a) *Polyommatus amandus*; b) *Polyommatus bellargus*; c) *Polyommatus coridon*; d) *Polyommatus damon*; e) *Polyommatus daphnis*; f) *Polyommatus dorylas*; g) *Polyommatus icarus*; h) *Polyommatus semiargus*; i) *Polyommatus thersites*. Az alsó sor bal oldali képén megadott skála valamennyi felvételre érvényes

Jól látható a SEM-felvételeken (3. ábra), hogy valamennyi faj pikkelyei hasonló szerkezeti elvek szerint épülnek fel: a hosszanti gerinceket keresztbordák kötik össze, és az ezek alkotta háló alatt egy lyuggatott lemez helyezkedik el.

A TEM-felvételek (4. ábra) azt mutatják, hogy



**4. ábra.** A 2. ábrán bemutatott kilenc lepkefaj hímjeinek jellemző pikkelyszerkezete TEM-ben. A nanostrukturáltakban a sötét részek a kitinnek felelnek meg, a világos részek a levegővel töltött üregeknek. a) *Polyommatus amandus*; b) *Polyommatus bellargus*; c) *Polyommatus coridon*; d) *Polyommatus damon*; e) *Polyommatus daphnis*; f) *Polyommatus dorylas*; g) *Polyommatus icarus*; h) *Polyommatus semiargus*; i) *Polyommatus thersites*

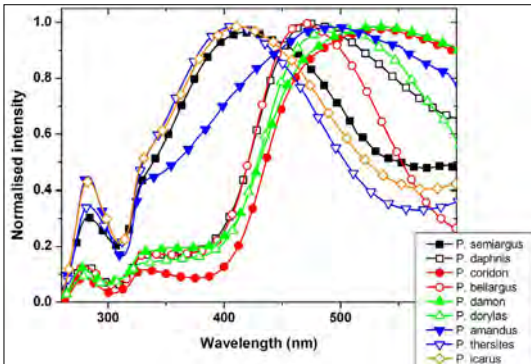
valamennyi szerkezet sötét (kitin) és világos (levegő) rétegek váltakozásával épül fel. Eltérések főleg a rétegek számában, illetve a rétegek rendezettségében mutatkoznak. A TEM-felvételek értelmezése során nem szabad eltekinteni attól, hogy a vizsgált minta csupán 70 nm vastagságú.



#### 4. A színek műszeres jellemzése

A lepkeszárnyak által visszavert fény színének jellemzésére száooptikás moduláris spektrométert alkalmaztunk. Az eredményeket az **5. ábrán** mutatjuk be.

Jól megfigyelhető az **5. ábrán**, hogy mindegyik spektrumnak jellegzetes, eltérő jegyei vannak. Ennek tulajdonítható, hogy egy, a mesterséges neurális háló elvén működő szoftver a betanító-lépések után 96%-os pontossággal azonosította a lepkék fajtát a szárnyfelszínük fényvisszaverése alapján [6].



**5. ábra.** A kilenc megvizsgált boglárkafaj hímjeinek szárnyfelszíni fényvisszaverése. A spektrális jellemzők jobb összehasonlíthatósága miatt valamennyi görbét egyre normáltuk

#### 5. Következtetések

A vizsgálataink megmutatták, hogy a boglárkalepkék kék és zöld színei szerkezeti eredetűek, olyan nanokompozitoktól erednek, amelyek két, eltérő törésmutatójú anyag: a kitin és levegő térben periodikus váltakozása útján fotonikus tiltott sávot hoznak létre. A fotonikus nanoarchitektúra a pikkelyek térfogatát tölti ki. A pikkelyek szabályos rendben borítják a szárnyak felszínét.

Az így létrehozott színek fajspecifikusak, és a szexuális kommunikációban játszanak fontos szerepet. Éppen ezért generációról generációra nagy pontossággal reprodukálódnak [10].

#### Köszönetnyilvánítás

A munka elvégzését a következő OTKA-támogatások tették lehetővé: 111741. és 115724.

#### Szakirodalmi hivatkozások

[1] Yablonoitch E.: *Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics*. Physical Re-

view Letters 58. (1987) 2059–2062.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2059>

[2] John S.: *Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices*. Physical Review Letters 58. (1987) 2486–2489.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2486>

[3] Edagawa K., Kanoko S., Notomi M.: *Photonic Amorphous Diamond Structure with a 3D Photonic Band Gap*. Physical Review Letters 100. (2008) 013901.

<http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.013901>

[4] McNamara M. E., Briggs D. E. G., Orr J. P., Wedmann S., Noh H., Cao H.: *Fossilized Biophotonic Nanostructures Reveal the Original Colors of 47-Million-Year-Old Moths*. PLoS Biology 9. (2011) e1001200.

<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001200>

[5] Bíró L. P., Vigneron J. P.: *Photonic nanoarchitectures in butterflies and beetles: valuable sources for bioinspiration*. Laser and Photonic Review 5. (2011) 27–51.

<https://doi.org/10.1002/lpor.200900018>

[6] Bálint Z., Kertész K., Piszter G., Vértesy Z., Bíró L. P.: *The well-tuned blues: the role of structural colours as optical signals in the species recognition of a local butterfly fauna (Lepidoptera: Lycaenidae: Polyommatae)*. Journal of the Royal Society. Interface 9. (2012) 1745–1756.

<https://doi.org/10.1098/rsif.2011.0854>

[7] Bíró L. P., Bálint Zs., Kertész K., Vértesy Z., Márk G. I., Horváth Z. E., Balázs J., Méhn D., Kiricsi I., Lousse V., Vigneron J.-P.: *Role of photonic-crystal-type structures in the thermal regulation of a Lycaenid butterfly sister species pair*. Physical Review E 67. (2003) 021907.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.67.021907>

[8] Kertész K., Bálint Z., Vértesy Z., Márk G. I., Lousse V., Vigneron J.-P., Rassart M., Bíró L. P.: *Gleaming and dull surface textures from photonic-crystal-type nanostructures in the butterfly Cyanophrys remus*. Physical Review E 74. (2006) 021922-1–021922-15.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.021922>

[9] Kertész K., Molnár G., Vértesy Z., Kóos A. A., Horváth Z. E., Márk G. I., Tapasztó L., Bálint Zs., Tamáska I., Deparis O., Vigneron J.-P., Bíró L. P.: *Photonic band gap materials in butterfly scales: A possible source of “blueprints”*. Materials Science and Engineering B 149 (2008) 259–265.

<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.10.013>

[10] Kertész K., Piszter G., Bálint Z., Bíró L. P.: *Bio-geographical patterns in the structural blue of male Polyommatus icarus butterflies*. Scientific Reports 9. (2019) 2338.

<https://doi.org/10.1038/s41598-019-38827-w>

# Hatóanyag-kibocsátó koszorúérsztentek bevonatának vizsgálata

## Examination of Coating of Drug-Eluting Coronary Stents

Asztalos Lilla,<sup>1</sup> Horicsányi Krisztina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, lilla@eik.bme.hu*

<sup>2</sup> *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, Budapest, Magyarország, horicsanyi.krisztina@gmail.com*

### Abstract

Drug-eluting stents provide a solution for treating restenosis in arteries expanded by using conventional bare metal stents, but there are a small number of publications on the processes of coating damage established due to the various effects that occur during the life cycle of the stent. In the current research damage to the coating was investigated along with the effects of damage on the corrosion resistance of the stent in multiple ways. This research investigates not only traditional drug eluting stents with polymer matrix, but also the new generation of polymer-free types.

**Keywords:** *coronary stent, drug-eluting stent, coating, corrosion.*

### Összefoglalás

A hatóanyag-kibocsátó sztentek megoldást jelentettek a hagyományos fémsztentekkel kezelt artériákban kialakult restenózis kezelésére, de a sztent teljes életciklusa alatt fellépő, különböző hatásokra bekövetkező károsodási folyamatairól kevés publikáció lelhető fel. A jelenleg folyó kutatásban több szempontból is vizsgáljuk a bevonat károsodásait és annak hatását a sztentnek a korrózióval szembeni ellenállására. A vizsgálatok során nemcsak a hagyományos, polimer mátrixba kevert hatóanyagot kibocsátó sztenteket vizsgáltunk, hanem új generációs, polimermentes típusokat is.

**Kulcsszavak:** *koszorúérsztent, hatóanyag-kibocsátó sztent, bevonat, korrózió.*

## 1. A hatóanyag-kibocsátó sztentek

A 2000-es évek elején jelentek meg ezek az ún. hatóanyag-kibocsátó sztentek, amelyek segítségével a neointimális proliferációt, az insztent restenózis elsődleges okát 5–10%-ra sikerült visszaszorítani. Bár a fémsztentek (BMS) architektúrájának és mechanikai tulajdonságainak optimalizálása ezzel párhuzamosan szintén a restenózis kialakulásának csökkentéséhez vezetett, a gyógyszer-kibocsátó sztentek alkalmazása nem szorult háttérbe [1].

A hatóanyagoknak a sztentre történő felviteléhez a technikákat három csoportba sorolhatjuk:

(a) a hatóanyagot közvetlenül a fém felületére viszik fel, (b) a hatóanyagot a fémsztent felületi pórusaiba történő bejuttatása, (c) a hatóanyagot egy polimerhez kötik, amit majd aztán bevonatként használnak az implantátum felületén [1, 2]. A sztentek felületére nemcsak olyan bevonat kerülhet, amely gyógyszeres hatóanyagot bocsát ki, hanem gyógyszer nélküli bevonatos sztentek is léteznek. Előbbi sztenteket aktív, az utóbbiakat passzív bevonatosnak nevezzük [3]. A passzív bevonatú sztentek fő előnye, hogy „láthatatlanná” teszik a fémeszközt a környező szövetek számára. A passzív bevonatoknak biztosítaniuk kell az optimális kölcsönhatást a vérrrel és az artériával.

falával [4]. A bevonatkészítési technikák közül a (c) módszer a legelterjedtebb napjainkban, viszont a nem lebomló polimerek és a lassú gyógyszerkioldódás miatti hosszú távú problémák kiküszöbölése érdekében az (a) módszerrel készített, polimer hordozóanyag nélküli gyógyszeres sztentek is egyre több gyártó termékpalettáján jelennek meg [5].

A sztentbevonatokkal szemben támasztott legfontosabb követelmények a megfelelő tapadás és hatóanyag-kibocsátási képesség, de fontos maga a hordozó polimer alapanyaga, a bevonat felületének a minősége stb. A BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékén több korábbi kutatás is foglalkozott a kereskedelmi forgalomban kapható bevonatos sztentek vizsgálatával és poliuretán alapanyagú bevonatok fejlesztésével is [6, 7]. A bevonatspecifikus kutatások óta eltelt időben több, korábban nem vizsgált bevonattípus jelent meg a piacon, valamint a lebomló műanyagok és polimer hordozóanyag nélküli típusok is egyre nagyobb teret hódítanak [8, 9]. Az újfajta bevonattípusokból eddigi kutatásaink során everolimus hatóanyagot tartalmazó, poli(vinilidén-fluorid-ko-hexafluor-propilén) (a továbbiakban PVDF-HFP) bevonatú, platina-króm ötvöztetű acélsztentek bevonatkárosodásait vizsgáltuk [10], jelen kutatásunkban viszont már többféle alapanyagot és bevonattípust is megfigyeltünk. Korróziós méréseket szintén végeztünk koszorúérsztenteken [11], a mérések újragondolásában és kiértékelésében a Pécsi Tudományegyetem Általános és Fizikai Kémiai Tanszéke volt segítségünkre.

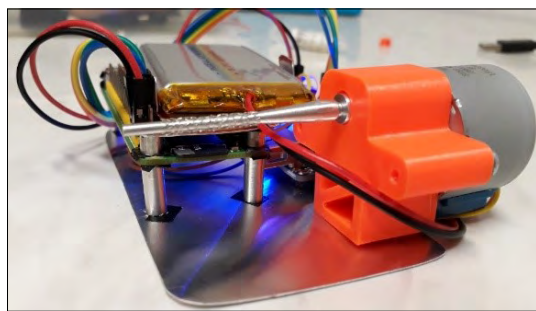
## 2. A kutatómunka

### 2.1. A bevonatkárosodás vizsgálata

A hatóanyag-kibocsátó sztentek bevonatát elektronmikroszkóppal vizsgáljuk. Ez idáig azonban az elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálathoz a sztenteket egy kétoldalú speciális ragasztószalaggal rögzítettük a mintatartóhoz. A módszer során problémát jelentett, hogy a sztent új pozícióba állításához ki kellett vennünk a mikroszkóp kamrájából, le kellett vennünk a ragasztószalagról, majd az elmozdítás után újra kellett rögzíteni azt. Ez a folyamat a vákuumozás miatt időigényes, és a sztent minden egyes levételekor a ragasztószalag károsíthatja annak bevonatát.

A probléma kiküszöböléséhez fejlesztettünk egy olyan befogó- és mozgatókészüléket, amellyel a kamra kinyitása nélkül lehet forgatni a vizsgált sztentet, azért, hogy a palástja mentén vizsgálni

tudjuk a sztent bevonatát. A tervezett eszközből elkészítettünk egy prototípust (1. ábra). A sztent-forgatót a BME ATT-n található Zeiss EVO MA 10 típusú elektronmikroszkóp kamrájába terveztük. A prototípuseszköz elfér az elektronmikroszkóp kamrájában (2. ábra), a tengely mozgatásáért felelős léptetőmotort Arduino szabad szoftveres, nyílt forráskódú elektronikai fejlesztőplatformra szerelve, Raspberry Pi egykártyás számítógéppel programozva, WiFi-n keresztül tudjuk irányítani, a hálózaton keresztüli irányítás pedig zárt kamraállásban is működőképes. A prototípuseszköz fejlesztési céljai között szerepel a további méretcsökkentés és az elektronikai részekre burkolat tervezése.



1. ábra. A sztentbefogó és -forgató eszköz prototípusa

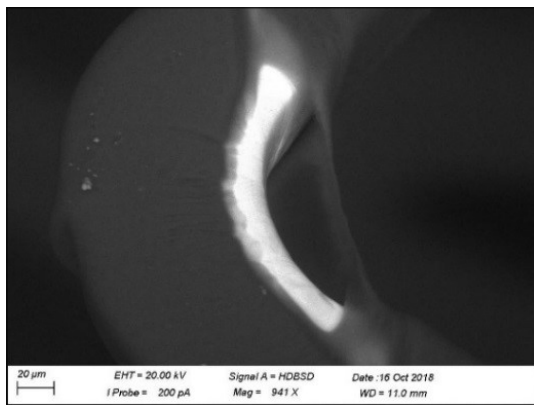


2. ábra. A sztentbefogó-prototípus elhelyezése a Zeiss EVO MA 10 elektronmikroszkóp kamrájában

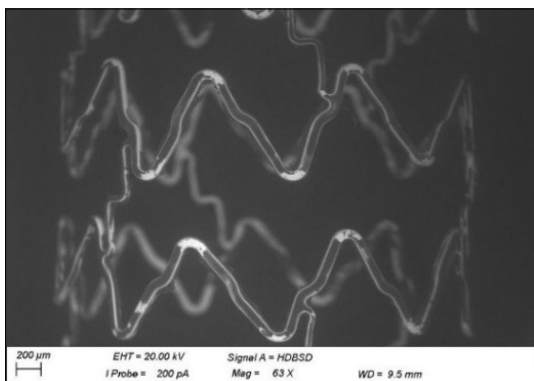
A kutatásunk során a korábban is vizsgált PVDF-HFP bevonatú, platina-króm ötvözesű acél sztentek mellett vizsgáltunk amorf szilícium-karbid bevonatos, kobalt-króm ötvözesű acélsztenteket, valamint polimer kötőréteg nélküli, hatóanyag-kibocsátó bevonatos sztentet is.

Az amorf szilícium-karbid bevonat a PVDF-HFP bevonathoz hasonlóan, csupán a tágítás hatására több helyen, jellemzően a bordaívekben szakadozott fel (**3. ábra**). A két bevonattípust összehasonlítva a PVDF-HFP bevonat károsodott kisebb mértékben.

A polimer hordozóanyag nélküli, hatóanyag-kibocsátó bevonatos sztentek esetében a károsodás sokkal nagyobb mértékű, ami részben azzal magyarázható, hogy a folyadékkozegeben történő tágítás során a bevonat egy része már a tágítás előtt leoldódott a sztent felületéről, valamint a bevonat vastagsága is sokkal kisebb ezeken a típusokon (**4. és 5. ábra**).



**3. ábra.** Amorfszilikium-karbid bevonat károsodása tágítás után, kobalt-króm ötvözet alapanyagú sztenten



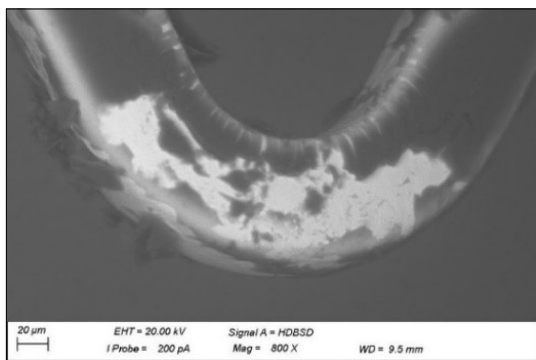
**4. ábra.** Polimer hordozóanyag nélküli, hatóanyag-kibocsátó bevonatos sztent két gyűrűje elektronmikroszkópos képen

## 2.2. Értékelési rendszer a bevonatkárosodások osztályozására

Az előzőekben láthattuk, hogy a sztentbevonatok károsodása leginkább a fémfelülettől való elválásban mutatkozik meg. Ez alapján egy objektív kiértékelési rendszerhez azt kell megvizsgáljunk, hogy a bevonat összfelületének mekkora része vált le a fémről. Azért, hogy a különböző méretű sztentek egymással összehasonlíthatók legyenek, a károsodott felület teljes felülethez vett aránya alapján célszerű mérőszámot képezni.

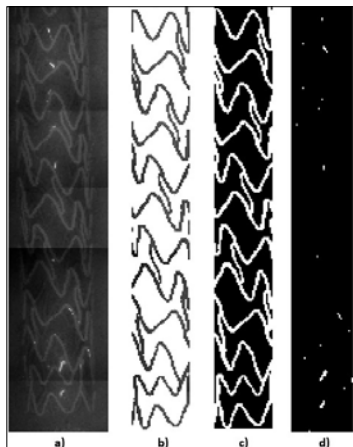
A pásztázó elektronmikroszkóppal nem tudunk olyan kis nagyítású képet készíteni, hogy a sztent teljes hossza egy képen látható legyen, ezért a sztentet szakaszonként fényképezzük be, majd képszerkesztő program segítségével összeállítjuk a sztent terítékét.

Visszaszórtelektron-detektálással a bevonat hibái jól elkülöníthetők, ugyanis az ép polimerbevonat sötétebb, míg a károsodott szakaszokon előtűnő fém világosabb színnel jelenik meg a képeken (**3–5. ábra**). Ezt kihasználva egy megfelelő szoftver segítségével meg lehet határozni azt, hogy a sztent felületének mekkora hányadán károsodott a bevonat. A képelemzéshez először egy MATLAB-kóddal levágjuk a sztentet a kép többi részéről, hogy a sötét háttér ne okozzon gondot a képelemzés során. Ezt követően binarizáljuk a képeket, majd a különböző sötétségű pixelek számolásával megkapunk egy mérőszámot, amely a károsodott felületnek a vizsgált vetületen vett aránya. A képfeldolgozás lépései a **6. ábrán** láthatóak. A szemléltető ábrák a sztentforgató berendezés rendelkezésre állása előtt készültek. A sztentforgató berendezés fejlesztésével elérhetjük, hogy a bevonatkárosodás mértékét a sztent teljes külső felületére nézve meg tudjuk határozni.



**5. ábra.** A polimer hordozóanyag nélküli, hatóanyag-kibocsátó bevonatos sztent bordáinak csúcsán a bevonat nagymértékű repedezése és lemezkék formájában való leválása figyelhető meg





6. ábra. A képfeldolgozási folyamat lépései:

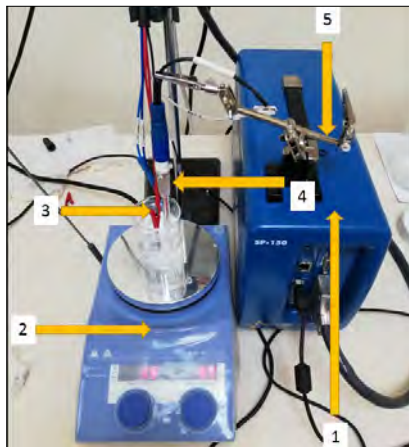
a) Az elektronmikroszkópos kép összeállítása. b) A sztent körülvágása. c) A kép binarizálása és komplementálása. d) A bevonatsérülések helye a sztent felületén.

### 2.3. Korróziós vizsgálat: a nyitott áramköri potenciál mérése

A nyitott áramköri potenciállal (OCP) jellemezhető az anyag termodinamikai hajlama az elektrokémiai oxidációra. Az OCP-mérés során a munkaelektrodra nem vezetünk áramot, így egy ún. egyensúlyi vagy nyitott áramköri potenciál fejlődése rögzíthető a fém és az elektrolitoldat között. A nyitott áramköri potenciál változása az idő függvényében utalhat:

- oxidációra, ekkor a nyitott áramköri potenciál csökkenő tendenciát mutat;
- passzív réteg képződésére, ekkor a szabadpotenciál növekvő tendenciát mutat; valamint
- inhibítort tartalmazó közegben a potenciál konstans [12].

A mérési módszer előnye, hogy független a próbatestek méretétől, ezért a különböző átmérőjű és hosszúságú sztentek könnyebben összehasonlíthatók, mint egyéb elektrokémiai méréseknél, továbbá a sztentfelületek nagyságának pontos meghatározása is összetett folyamat, emiatt érdemes az olyan módszereket előtérbe helyezni, amelyeknél ez a tényező kizárható. Az OCP-méréseket standard, kételektrodos cellában kell elvégezni. A mérés során elektrolitnak foszfát pufferoldatot (PBS) használtunk, amelynek összetétele: 800 g vízhez 8 g NaCl; 0,2 g KCl; 1,44 g  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ; 0,24 g  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , a pH értéke 7,4-re beállítva. Referenciaelektrodnak  $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  kalomelektrodot alkalmaztunk. A mérések során az elektrolit hőmérsékletét  $37 \pm 1^\circ\text{C}$ -os hőmérsékleten tartottuk, és kis fordulatszám (80 fordulat/perc) folyama-



7. ábra. Az OCP-méréshez használt kételektrodos cella elrendezése

tosan kevertük. A mérési elrendezés a 7. ábrán látható. A képen jelölve:

1. Potenciosztát (Biologic SP-150)
2. Fűthető mágneses keverő (IKA RCT basic)
3. Munkaelektrod
4. Referenciaelektrod
5. Állvány

A mérések során vizsgált sztentek legfőbb jellemzőit: alapanyag, bevonat anyaga, tágitási nyomás (TNY) az 1. táblázat foglalja össze, valamint a továbbiakban a táblázat szerinti jelöléssel hivatkozom az egyes mintadarabokra.

A felsorolt sztentek 3600 másodperc mérési idő utáni szabadpotenciál-értékét, valamint a szabadpotenciál változását a 2. táblázat tartalmazza.

Az ausztenites korrózióálló acél (X2CrNiMo18-15-3) alapanyagú sztentek szabadpotenciálértéke pozitív, valamint növekvő tendenciát mutat.

A kobalt-krom ötvözeteknél (Co-Cr-W-Ni ötvözet) négy esetben csökkenő, két esetben pedig növekvő tendenciát mutatott az OCP-mérés. Az 1. táblázatból látható, hogy a vizsgált kobalt-krom ötvözetből készült sztentek különböző gyártók termékei. A bevonat nélküli sztentek esetében az anyagösszetétel-mérési eredmények alapján megállapítottuk, hogy ugyan mindegyik sztent az alapanyagra vonatkozó ISO 5832-5 szabvány szerinti anyagösszetételnek megfelel, a csökkenő tendenciát mutató sztentek volfrámtartalma a szabvány által megengedett felső határérték (16%), a növekvő tendenciát mutató anyagok esetében pedig az alsó határérték (14%) közelében volt. Az S3, S4 sztentekről készített elektronmikroszkópos képeken látható továbbá, hogy a volfrámszemcsék a szemcsehatárok szélén



**1. táblázat.** A vizsgált sztentek összefoglaló táblázata. A tágítási nyomás (TNY) esetében az MP a maximális megengedett nyomást, az NP pedig a névleges nyomást jelöli. Ezek a nyomásértékek a gyártók által meghatározott értékek, sztenttípusonként eltérők

Jel	Anyag	Bevonat	TNY	Gyártó
S1	X2CrNiMo18-15-3	Nincs	MP	A
S2	X2CrNiMo18-15-3	Nincs	NP	A
S3	Co-Cr-W-Ni	Nincs	MP	B
S4	Co-Cr-W-Ni	Nincs	NP	B
S5	Co-Cr-W-Ni	Amorf SiC	MP	C
S6	Co-Cr-W-Ni	Amorf SiC	NP	C
S7	Co-Cr-W-Ni	Nincs	NP	D
S8	Co-Cr-W-Ni	Polimer kötőanyag nélküli	NP	D
S9	Fe-Pt-Cr	Nincs	NP	E
S10	Fe-Pt-Cr	PVDF-HFP	NP	E

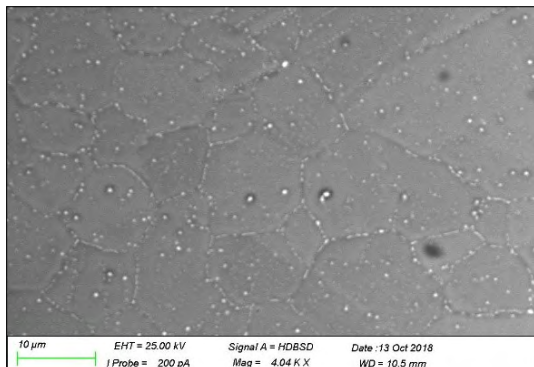
**2. táblázat.** A 3600 másodperc mérési idő végén mért szabadpotenciál-értékek, valamint a szabadpotenciál változása a kiindulási potenciálértékhez képest

Szent	Szabadpotenciál 3600 mp után	Szabadpotenciál változása
S1	0,0439	0,1167
S2	0,0424	0,1158
S3	-0,2097	-0,0348
S4	-0,1051	-1,0767
S5	-0,2953	-0,7531
S6	-0,2496	-0,0242
S7	-0,2256	0,1157
S8	-0,2188	0,1344
S9	0,1242	0,0680
S10	0,2173	0,0522

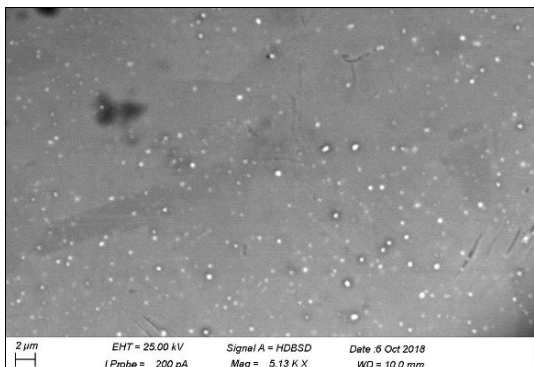
helyezkednek el (8. ábra), míg az S7-es esetében a szemcsék eloszlása homogén (9. ábra). A 10. és 11. ábrán látható, hogy az S3 sztent felületén sokkal több a hiba, mint az S7 esetében, ami a gyártók által alkalmazott különböző felületkezelésből eredhet. Az egyenetlenebb sztentfelszín negatívan hathat a korróziós folyamatokra. A potenciálérték viszont mind a 6 vizsgált esetben negatív előjelű, így a tendenciától függetlenül is gyengébb ennek az ötvözettypusnak a korrózióval szembeni ellenállása, mint a másik két ötvözettypusé.

A tágítási nyomás növelése nem mutatott egyértelmű tendenciát egyik ötvözet esetében sem.

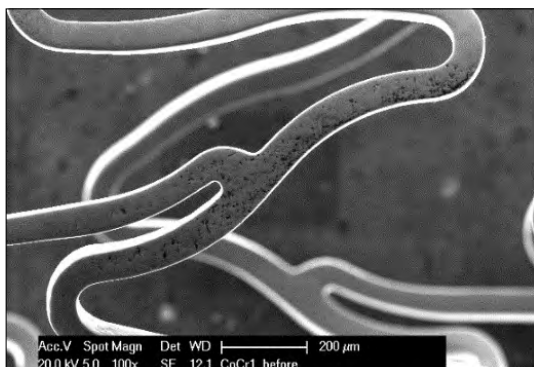
A polimer bevonatos Fe-Pt-Cr sztent nyitott áramkörös potenciál értéke a legnagyobb a vizs-



**8. ábra.** Az S3 sztent részletének elektronmikroszkópos képe a korróziós vizsgálatok előtt, a volfrám-szemcsék a szemcsehatárok mentén

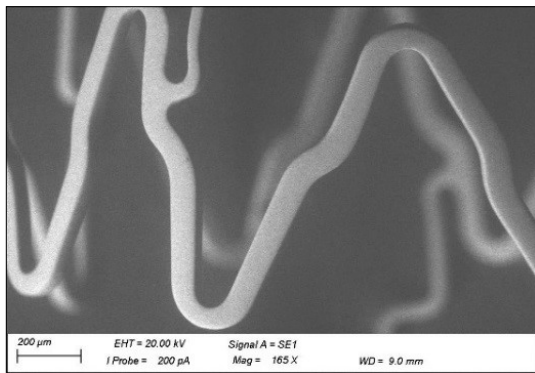


**9. ábra.** Az S7 sztent részletének elektronmikroszkópos képe a korróziós vizsgálatok előtt, a volfrám-szemcsék eloszlása homogénebb, mint az S3 sztent esetében



**10. ábra.** Az S3 sztent részletének elektronmikroszkópos képe a korróziós vizsgálatok előtt

gált 10 sztent közül, ezt követik a bevonat nélküli Fe-Pt-Cr, majd a bevonat nélküli ausztenites korrózióálló acél sztentek. A polimer nélküli gyógyszeres bevonat nem befolyásolta jelentősen a szabadpotenciál értékét, ennek elsődleges oka az, hogy a bevonat egy része leoldódott a mérés során, amiatt nem tud olyan szigetelôhatást kifeje-



**11. ábra.** Az S7 sztent részletének elektronmikroszkópos képe a korróziós vizsgálatok előtt

teni, mint az Fe-Pt-Cr sztentek PVDF-HFP, vagy az S5, S6 sztentek amorf szilícium-karbid bevonata.

### 3. Összegzés

Jelen kutatásunk elsődleges célja egy vizsgálati módszer kidolgozása volt, amellyel a polimeres és a polimermentes hatóanyag-kibocsátó bevonatos sztentek bevonatkárosodását olyan módon tudjuk megfigyelni, hogy a vizsgált eszközök rögzítése és eltávolítása a tartóról ne járjon a vizsgált darab károsodásával. Ehhez létrehoztuk egy olyan eszköz prototípusát, amely lehetővé teszi a sztentek rögzítését és forgatását az elektronmikroszkóp kamráján belül úgy, hogy a vizsgálat közben sem a mintadarab, sem a rajta lévő bevonat nem sérül. Az így készített elektronmikroszkópos képek kiértékelésére is kidolgoztunk egy módszert, amely MATLAB szoftver segítségével számszerűsíti a bevonatkárosodás mértékét a vizsgált sztenteken.

A kutatásunk második felében nyitott áramköri potenciális, elektrokémiai korróziós vizsgálatokat végeztünk, hogy a bevonatoknak a korróziós tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgáljuk. A méréseink alapján megállapítható, hogy a polimer mátrixú, hatóanyag-bevonatos sztentek korrózióval szembeni ellenállása jobb, mint a bevonat nélküli sztenteké, a polimermentes bevonat viszont nem gyakorolt jelentős hatást a korrózióval szembeni ellenállásra. Az eredményeink jó alapot szolgáltatnak a bevonatok fejlesztésére fókuszáló új kutatásainknak.

### Köszönetnyilvánítás

Kutatásunk Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-3-II kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült. A sztentforgatóval kapcsolatos munkálatokban nyújtott segítségéért köszönet illeti Meisel Ádám gépészmérnök hallgatót.

Köszönjük a Pécsi Tudományegyetem Általános és Fizikai Kémiai Tanszék munkatársainak, hogy biztosították a mérőberendezést.

### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Mani G. et al.: *Coronary stents: A materials perspective*. *Biomaterials*, 28. (2006) 1689–1710. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.11.042>
- [2] Wienke H. et al.: *Stent coating with titanium-nitride-oxide for reduction of neointimal hyperplasia*. *Circulation* 2001, 928–933. <https://doi.org/10.1161/hc3401.093146>
- [3] Bognár E. et al.: *Investigation of Drug Eluting Stents*. *Materials Science Forum*, 589. (2008) 361–366. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.589.361>
- [4] Bognár E. et al.: *Investigation of Coated Coronary Stents*. *Materials Science Forum*, 537–538. (2007) 307–314. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.537-538.307>
- [5] Hausleiter J. et al.: *Prevention of restenosis by a novel drug-eluting stent system with a dose-adjustable, polymer-free, on-site stent coating*. *European Heart Journal*, 26/15. (2005) 1475–1481. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehi405>
- [6] Selley T. L. et al.: *Development of adhesion test for coated medical device*. *Biomechanica Hungarica*, 2013, 303–310. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehi405>
- [7] Ginsztler J. et al.: *Development and Manufacturing of Coronary Stents in Hungary*. *Materials Science Forum*, 537–538. (2007) 631–638. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.537-538.631>
- [8] Khan W. et al.: *Drug eluting stents: Developments and current status*. *Journal of Controlled Release*, 161/2. (2012) 703–712. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2012.02.010>
- [9] Park J. K. et al.: *Development of a novel drug-eluting stent consisting of an abluminal and luminal coating layer dual therapy system*. *RSC Advances*, 5. (2015) 40700–40707. <https://doi.org/10.1039/C5RA04270D>
- [10] Horicsányi K. et al.: *Effect of Expansion Pressure on the Drug Eluting Coating of Coronary Stents*. *Acta Materialia Transylvanica*, 1/1. (2018) 37–40. <https://doi.org/10.2478/amt-2018-0012>
- [11] Asztalos L., et al.: *Kobalt-krom ötvözet alapanyagú sztentek korróziós tulajdonságainak vizsgálata*. *Műszaki tudományos közlemények*, 7. (2017) 79–82. <https://doi.org/10.33895/mtk-2017.07.12>
- [12] Jiménez Y. S. et al.: *Interpretation of open circuit potential of two titanium alloys for a long time immersion in physiological fluid*. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series I: Engineering Sciences*, 2/51. (2009) 197–204.

# A csíkmadarasi vasgyártásból visszamaradt leletek anyagszerkezeti vizsgálata

## Microstructural Characterisation of Archeologic Finds Discovered at the Ironworks in Mădăraş

Bitay Enikő,<sup>1</sup> Márton László,<sup>2</sup> Talpas János<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Marosvásárhely, Románia, [ebitay@ms.sapiientia.ro](mailto:ebitay@ms.sapiientia.ro)

<sup>2</sup> Erdélyi Múzeum-Egyesület, Műszaki Tudományok Szakosztálya, Kolozsvár, Románia, [martonlb@yahoo.com](mailto:martonlb@yahoo.com)

<sup>3</sup> Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár, Románia, [talpasjanos@gmail.com](mailto:talpasjanos@gmail.com)

### Abstract

In the middle of the 16th century the ironworks of Mădăraş was one of the important centres of iron production. During its one and a half century lifespan its output provided a significant part of Transylvania's iron supply. While it operated it used up the entire raw material extracted in the iron ore mines of the Felcsík basin. This study presents the reconstructed ground-plan of the ironworks, its layout on the shores of the Mădăraş creek, and the chemical composition and microstructure of the samples discovered during exploration of the location by means of XRF analysis, EDS analysis and metallography. The analysis of the pig iron, the steel and the slag although performed on individual samples, still provides a good approach regarding the products of the ironworks, their chemical composition and microstructural characteristics.

**Keywords:** *ironworks, microstructure, metallography, spectrometry, use of waterpower, melting, smithy.*

### Összefoglalás

A XVI. század közepén az erdélyi vasgyártás egyik központja a csíkmadarasi hámor volt. Másfél évszázados működése alatt termelése jelentősen hozzájárult Erdély vasszükségletének kielégítéséhez. A csíkmadarasi hámor működtetése idején a Felcsíki-medence vasérclelőhelyein kitermelt nyersanyag mind a madarasi olvasztóba került. Jelen dolgozat ismerteti a hámor elhelyezkedését a Madaras-patak partján, valamint a metallográfia, az XRF- és az EDS-spektrometria felhasználásával, a terep bejárása során előkerült termékek összetételét és mikroszerkezetét. A nyersvas, az acél és a salak elemzése, bár egyedi minták felhasználásával készült, megközelítő képet nyújt a termékek összetételéről, mikroszerkezeti sajátosságairól.

**Kulcsszavak:** *vashámor, anyagszerkezet, metallográfia, spektrometria, vízenergia-hasznosítás, olvasztókemence, kovácsműhely.*

### 1. Bevezető

A fejedelemség korában Székelyföldön a már ismert és az újabban feltárt vasérclelőhelyek körül kiterjedt bányászatról, vasgyártásról és -feldolgozásról korabeli dokumentumok is tanúskodnak [1], [2]. A XVI. század közepén már az erdélyi vasgyártás [3] egyik központja, a csíkmadarasi hámor is termelt [4], [5]. Másfél évszázados fennállása alatt termelése jelentősen hozzájárult Erdély vas szükségletének kielégítéséhez. Jövedelmezősége

mellett további jelentősége, hogy Csíkszék tíz helységének lakosai dolgoztak a madarasi vashámorban, ezáltal mentesültek adóterheik alól, mi több, a bányaművelésben dolgozó jó néhány csíki, gergyói és kászoni személynek Báthory Zsigmond, Erdély fejedelme lófőséget adományozott [6].

Abban az időben már ismert volt, hogy a Hargita csíkmadarasi szakaszán vasérc található. A madarasi hámor tevékenységére az is jellemző, hogy gyakorlatilag az egész Felcsíki-medence vasércbá-

nyáinak terméke – a vaskő – a hámor nyersanyagaként a madarasi olvasztóba került. 1695-ben kezdetét vette a madarasi vashámor rohamos hanyatlása, és egy 1703-ból származó leltári összeírás már a hámor siralmas állapotát jegyzi. Ekkor csupán 40 forintért adták bérbe, amikor egy ökör piaci ára 10–14 forint volt. 1722-ben, amikor újból bérbe adták, a szerződésben nem szerepel a vasgyártás kifejezés; csupán a területek és a még működő fűrészmalom jelentettek szerződéses értéket.

A hámor folyamatos tevékenysége az 1567 és 1725 közötti időszakra tehető. Megszűnését a vasérc hiányának tulajdonították, ami csupán egyike annak a sor hiányosságoknak, amelyben az első helyen, kétségen kívül, a hámor gazdáinak téves és helytelen szemlélete állt.

## 2. A hámor és termékei

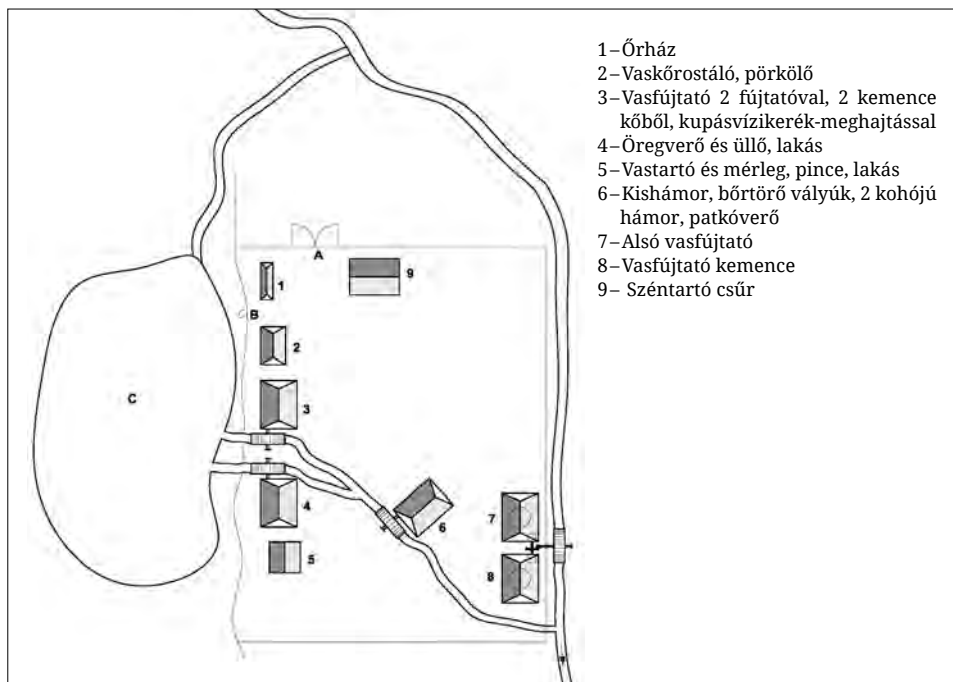
A csíkmadarasi vashámor működtetésében korának megfelelő műszaki színvonalú gépeket, szerszámokat és gyártási folyamatot alkalmaztak. A hámortelep ideális termelési feltételét a bő és állandó vízhozamú, gyors folyású patak, a Madaras-patak jelentette. Közel volt a szénégetés alapanyagát, a bükkfát adó erdő, mellette a vasérc lelőhelyei, s végül a salakképző anyag, a mészkö is. Áprilistól novemberig, a fagymentes hónapokban folyamatosan működhetett a hámor.

1673-ban a dolgozók száma 137 személy, ezek

közül csupán egy volt a vaskőkereső, akit a mai geológus megfelelőjének tekinthetünk. A bányászok, az olvasztárok, a kovácsok, a fújtatókészítő vargák, a csákányhegyező kovácsok, a vasverők és a szekeresek munkáját két hámori bíró irányította. Jól megszervezett üzem lehetett a csíki vasgyár. A termelt vas mennyisége elérte a 190 mázsát évente, amit, összehasonlítva a vajdahunyadi öt hámor termelésével, azt tapasztaljuk, hogy utóbbiak csupán 118 kilóval termeltek több vasat hetente, mint a csíkmadarasi hámor.

A termékek felett a fejedelmi udvar rendelkezett. Ezeket Radnótra, Görgénybe, Ebesfalvára, Fogarasra irányították, további feldolgozás céljából. Madarason szállvasat, serpenyőket, ágyugolyót, patkót, patkószveget és mezőgazdasági szerszámokat, eszközöket gyártottak. Kétszáznyolcvan év távlatából megállapítható, hogy a természet átalakító erejének és az emberi nemtörődömségnek az lett a folyománya, hogy ma csak szakember következtethet az egykor virágzó vasgyár méreteire. Egy 1677-ben készített leltár alapján készült az a helyszínrajz, amely először mutatja be a vashámor egykori lehetséges képét (1. ábra).

A helyszínrajz szerint a csíkmadarasi vashámor a Madaras-patak jobb partján helyezkedett el. A patakból leágazó malomárok a ma is fellelhető (az ábrán C jelzésű) egykori kiegyenlítő víztárolóba torkollott, amelynek az volt a szerepe, hogy ál-



- 1 – Őrház
- 2 – Vaskőrostáló, pörkölő
- 3 – Vasfújtató 2 fújtatóval, 2 kemence kőből, kupásvízikerék-meghajtással
- 4 – Öregverő és üllő, lakás
- 5 – Vastartó és mérleg, pince, lakás
- 6 – Kishámor, bőrtörő vályúk, 2 kohójú hámor, patkóverő
- 7 – Alsó vasfújtató
- 8 – Vasfújtató kemence
- 9 – Széntartó csűr

1. ábra. A csíkmadarasi vashámor helyszínrajza



landó hozammal és állandó nyomással biztosítsa a három vízikérék vízellátását. Egy negyedik vízikérék meghajtását maga a Madaras-patak látta el. A telepen két vasolvasztó kemence működött (3-as, 7-es szám jelöli), ezek termelését további feldolgozásra a 4-es és 6-os számmal jelzett kovácsműhelyekbe szállították.

A telepen a vaskőrostáló és a pörkölő (2) előkészítette a kitermelt vasércet a további feldolgozásra, az olvasztásra. Az 5-ös számmal jelzett épület a késztermékraktár volt. A széntartó csűr (9) fogadta a szénzállító szekerek rakományát, a faszenet. A fuvarok az A-val jelzett kapun léptek be az üzem területére. Ezekon kívül néhány épületnek több funkciója is volt, többek között lakások, bőrfeldolgozó műhely stb.

### 3. A vashámor anyagmaradványainak elemzése

Többszöri terepbejárás eredményeként különféle anyagmaradványok kerültek elő: salakmaradék, nyersvasmaradék és acélmaradék.

Ezekből az anyagdarabokból vizsgálati mintákat vágunk ki, amelyeket Thermo Niton XL3T típusú röntgenfluoreszcencia spektrométerrel (XRF), SPECTROTEST TXC25 típusú optikai emissziós spektrométerrel és Zeiss EVO10 pásztázó elektronmikroszkóp energiadisperzív spektrométerével (EDS) vegyelemeztünk. A felkutatott anyagminták felületét, illetve metallográfiai csiszolatokon a belső szerkezetét iqualitrol iMet-Y400 és Olympus PMG-3 típusú fémmikroszkóppal, továbbá sztereomikroszkóppal és pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk.

Az **1. táblázat** az XRF-es vegyelemzés eredményeit tartalmazza. A három adatsort elemezve a következőket állapíthatjuk meg:

- Az anyagmaradékok vastartalma 38,3–74% közé esik. Ebben csak az a rendhagyó a mai vas kohászati maradékok összetételi eredményeivel összevetve, hogy a salakmaradék vastartalma 38,3%, ami a gyenge kinyerés következménye. A salakban jelentős mennyiségű, értékes

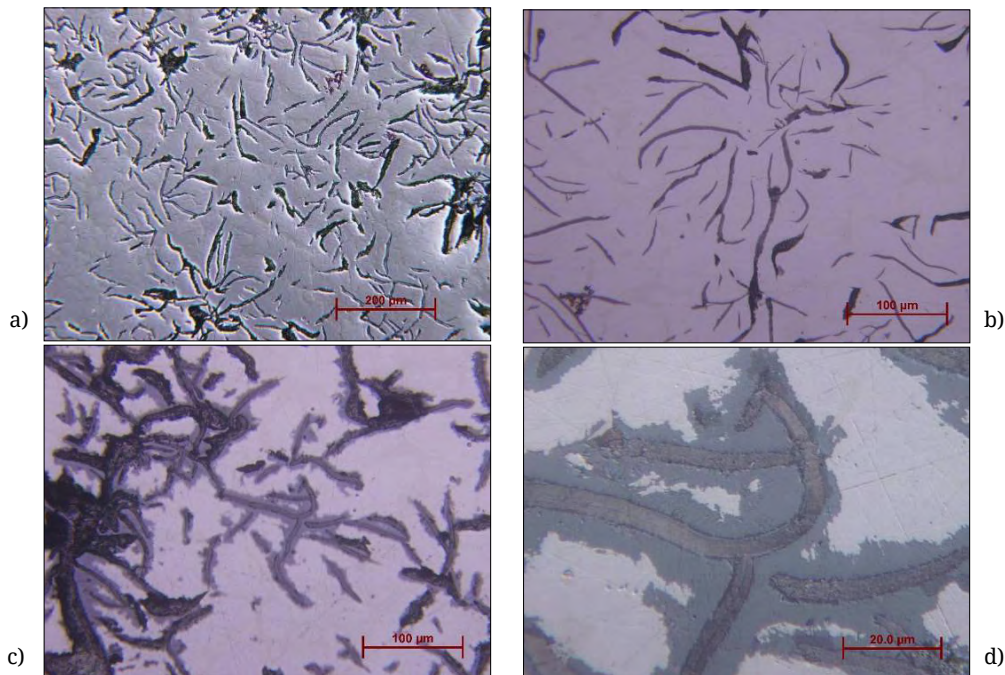
elemek, pl. Zn, Ni, Sb található, ezek kinyerése a három működése alatt felhalmozódott salakhegyből időszerű feladattá válhat.

- A nyersvasmaradék-mintadarab természetesen már vasban dúsabb: vastartalma 62,1%-ot tesz ki. Megjegyezzük, hogy a felmért, 5,8% Si-tartalom is jellemző az öntvényekre. A Cr- és Sb-tartalom nem túl nagy, de éppenséggel lehet a csikmadarasi vasércnek sajátossága. A metallográfiai vizsgálatra előkészített, csak polírozott, tehát nem maratott nyersvasmaradék-mintában jól látható a grafit rozettás eloszlása (lásd a **2.a-b ábrát**).
- Az acélmaradék mintadarab XRF-es elemzésében megjelenik a réz (290 ppm), ugyanakkor csökken a nikkel részaránya (38 ppm). A cink, alumínium, ón jelenléte komplex ércre utal, ugyanakkor kuriózum, hogy a vas olvadási hőmérsékletén megmaradtak ezek az elemek. Az itt előállított acél foszfor- és kéntartalma az XRF-es vizsgálat szerint csekély (a spektrométer nem mutatta ki ezen elemeket), de a metallográfiai vizsgálat és a csiszolatok különböző pontjaiban végzett EDS-analízis világosan mutatja, hogy az összetétel az acélminta csiszolatának különböző pontjaiban változó volt. A szennyezők mennyisége jelentős, és az anyagra a durva salakosság jellemző, ami természetes velejáráója a korabeli gyártási technológiának. A korabeli vasművességre jellemző többszöri felmelegítés és kovácsolás hatására a kezdetben nagyon inhomogén vasanyag homogenizálódhatott, kiégett a grafit és kikovácsolták belőle a salakot; így vált igazi, használható acéltermékké. Ha nagyobb mennyiségben kerülne elő nyersvas és acéltermék, amit elemezni lehetne, az eredmények is nagyobb pontosságúak lennének. Talán egy átfogó ásatás hozhatna felszínre újabb vas hulladékokat, bár a valószínűsége kicsi, tudva azt, hogy a leltárok pl. a bejárati kapu elemeinek rögzítésénél használt vasszegeket darabonként tartalmazzák.

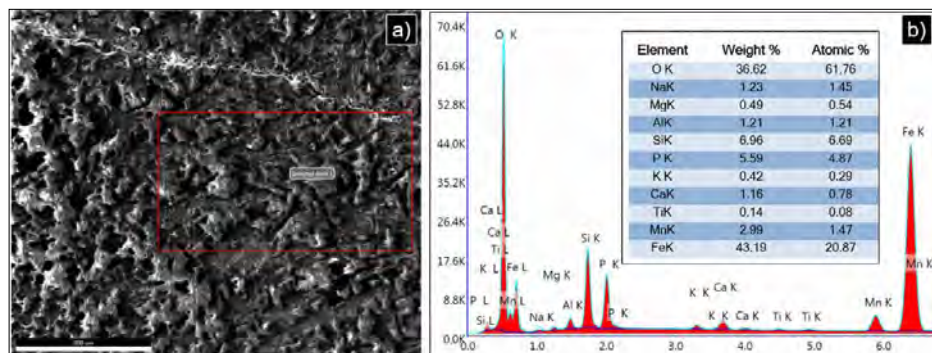
**1. táblázat.** Az XRF-es elemzés eredményei (%)

	Fe	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Zn	Mo	Al	Sb	Sn	As
Salakmaradék	38,3	3,2					0,0345	0,0092	0,0712			0,0077		0,0061
Nyersvasmaradék	62,1	0,75	5,8	0,11	0,76	0,0498						0,0109		
Acélmaradék	74						0,0038	0,0290	0,0100	0,0020	0,0100		0,0100	





2. ábra. A nyersvasmaradék mikroszerkezete polírozott állapotban, a minta belső részén (a–b), valamint a korrodálódott felület közelében (c–d)



3. ábra. A salakmaradék töretfelületének egy részlete (a), továbbá a rajta bejelölt területről felvett EDS-elemzés intenzitásdiagramja a kémiai összetétellel (b)

## 4. Az anyagmaradványok mikroszerkezetének vizsgálata

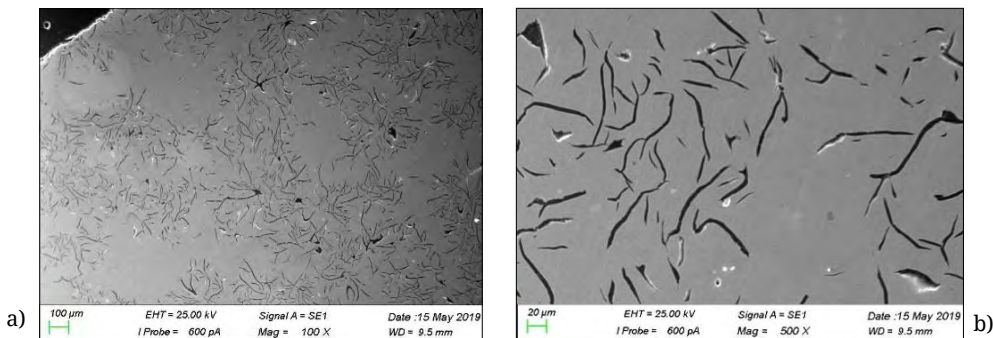
### 4.1. A salakmaradék vizsgálata

A helyszíni gyűjtés során talált anyagmaradékok közül a salakmaradék kémiai összetételét EDS-analízissel is meghatároztuk, a 3a. ábrán látható felületet vizsgálva, amely a salakdarabnak a belső töretfelülete. Az EDS-analízis intenzitásdiagramja és az abból meghatározott összetétel a 3b. ábrán látható. Az EDS-elemzést több területen is megismételve azt kaptuk, hogy tömegrészarányban a Fe-tartalom rendre 42–44%, a Si-tarta-

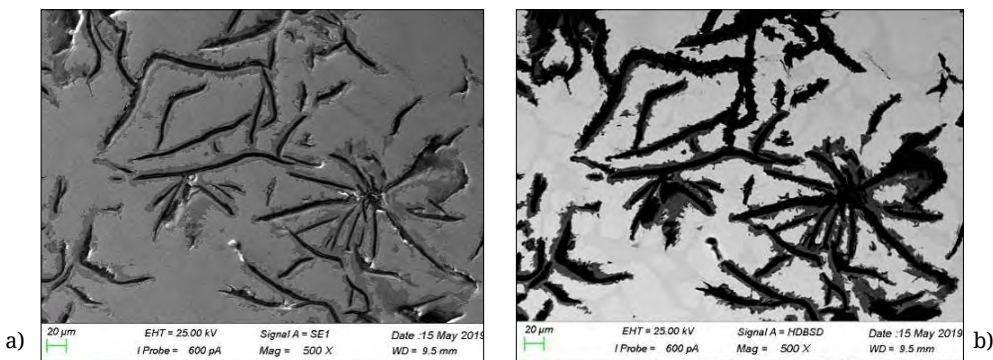
lom kb. 7%, a Mn-tartalom 2–3%, és 1%-nál több alumínium is jelen van a salakban. Az XRF-es elemzéssel összevetve feltűnő, hogy az EDS-elemzés jóval nagyobb mennyiséget mér a foszforra (5–6%); ez az eltérés rávilágít az XRF-es elemzés korlátaira [7–10].

### 4.2. A nyersvasmaradék vizsgálata

A leletből kivett anyagvizsgálati mintából metallográfiai csiszolatot készítettünk, amelyet polírozott állapotban és 4%-os Nital marószerral marva is vizsgáltunk, fémmikroszkóppal és pásztázó elektronmikroszkóppal egyaránt. A 2. ábrán az



4. **ábra.** A nyersvasmaradék szövetszerkezete polírozott állapotban, szekunderelektron-képen



5. **ábra.** A nyersvasmaradék felületközeli részének szövetszerkezete polírozott állapotban, szekunderelektron-képen

ISO 945-1:2019 szabvány szerint azonosítható a lemezes szerkezetű grafit alakja, eloszlása és mérete. A grafit alakja az I. és II. osztály határára esik, eloszlását tekintve a B osztályba (rozettás grafit), mérete alapján pedig a 3. és 4. fokozat határára sorolható a nyolcfokozatú skálán. A felült minta felülete közelében a ferrit és a grafit fázishatára mentén egyes sávban korrodálódott az anyag, ez látható a **2.c-d ábrán**.

A polírozott állapotban végzett vizsgálat csak a grafit szerkezetének meghatározását teszi lehetővé, a mátrix azonosításához a maratás elengedhetetlen [11]. A maratás azonban roncsolhatja a felületközeli rétegben a grafitlemezek határfelülete mentén korrodálódott részeket, ezért a maratás előtt végeztük el a pásztázó elektronmikroszkóp EDS-elemzőjével az anyag egyes, jellegzetes pontjai kémiai összetételének meghatározását. A **4. ábra** mutatja a polírozott állapotú minta szekunderelektron-képét. A **4.b ábrán** látható felület egészét vizsgálva a fő összetevők mennyisége a vas és a szén nélkül: Si = 0,77%, Mn = 1,17%, P = 1,72%.

A felületközeli rész szövetségét mutatja az **5. ábra**. A grafitlemezek fázishatárán korróziótermék képződött, amelyben az EDS-elemzés atomrészhányadban 43% vasat és 56% oxigént

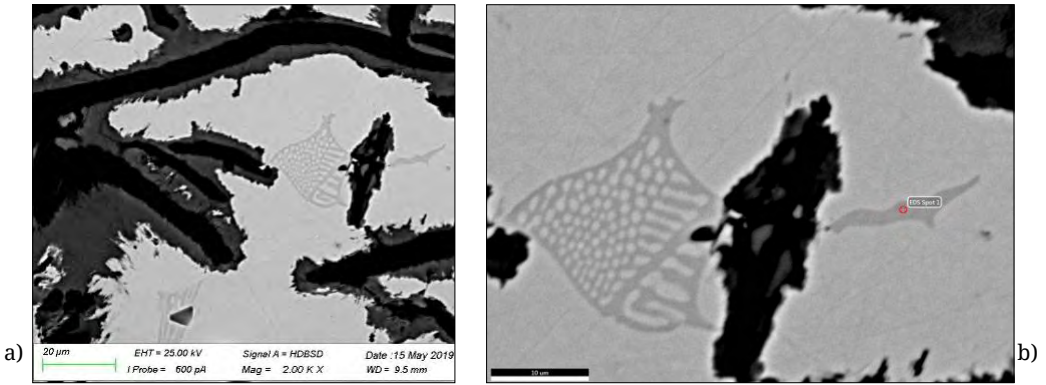
mutatott ki, amely arány közel áll a magnetit Fe/O arányához. Az **5.b ábra** egy részletét kinagyítva mutatja a **6. ábra**, amelyen jól látható egy foszfid-eutektikumot tartalmazó rész. Az eutektikumban a foszfor atomi részaránya 17%, a foszfidlemezben pedig 25%.

A Nitallal végzett maratás kitűnően előhívta a szövetszerkezet vasdús szövetelemeinek morfológiai jellemzőit. A **7. ábra** szövetekepeiből kitűnik, hogy a megszilárdulás során a rozettás grafit kiválása után az eutektikus hőmérsékletre hűlő olvadék mintegy ¾-e ausztenitté alakult. Az olvadék maradékából lédeburit alakult ki. A lehűlés eléggé gyors volt, amit az jelez, hogy mind a lédeburit, mind pedig az ausztenitből keletkezett perlit szerkezete rendkívül finom.

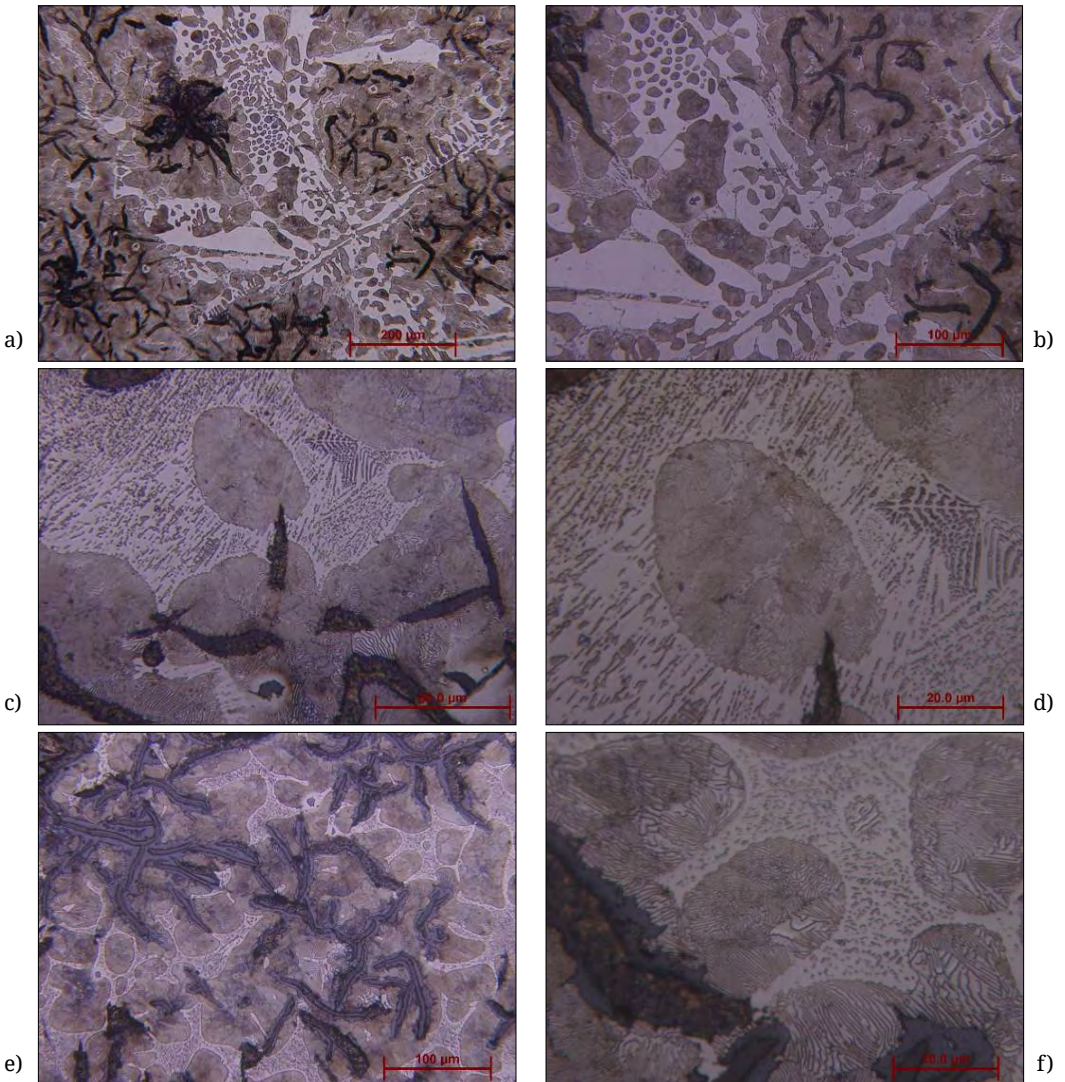
#### 4.3. Az acélmaradék vizsgálata

Ebből az anyagvizsgálati mintából is metallográfiai csiszolatot készítettünk, majd polírozott állapotban és Nital marószerezrel végzett maratás után is vizsgáltuk. A **8. ábra** szövetekepei arról tanúskodnak, hogy a lelet anyaga jelentős átalakításokon esett át a nyersvasvá alakítást követően. Az így kialakult szövetszerkezet fő jellemzői az alábbiak:





6. ábra. A szövetszerkezet foszfideutektikumot tartalmazó részlete szekunderelektron-képen



7. ábra. A nyersvasmaradék mikroszerkezete polírozott állapotban, a minta belső részén (a-b), valamint a korrodálódott felület közelében (c-d)



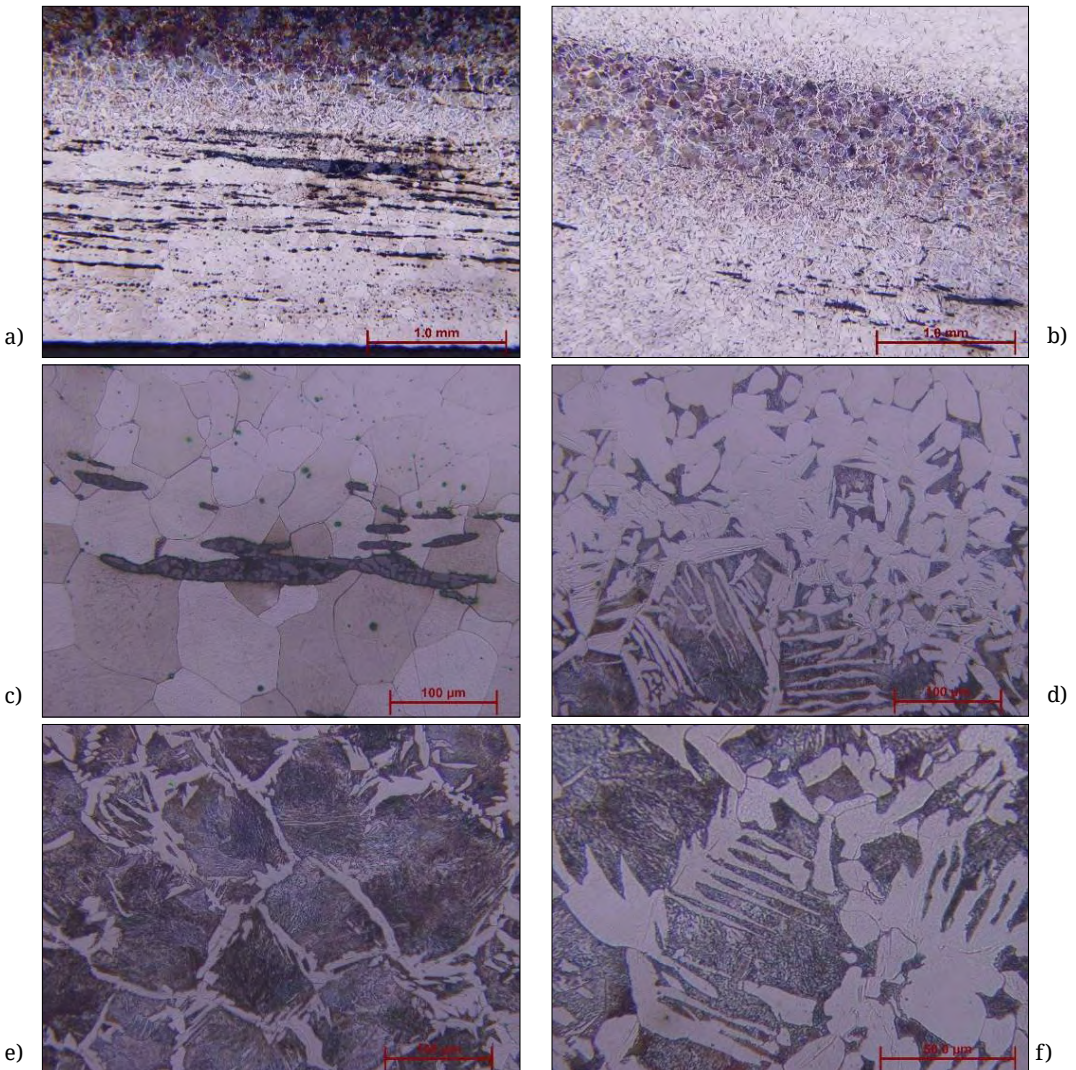
a) Az anyag a vastagság mentén nagyon erősen eltérő széntartalmú zónákra tagolódik. A kis C-tartalmú részekben csak a ferritszemcsék szemcsehatárai maródtak meg, míg a sötétre maródt zónákban nagy a C-tartalom, mivel itt csaknem teljesen eutektoidos az anyag összetétele. A **8.e ábrán** pl. a perlites tartományok alkotják a szövetnek kb. a 95%-át, a proeutektoidos ferrit csak kb. 5%-ot tesz ki.

b) Az anyag nagyon jelentős mértékben salakos, a salakzárványok főleg a felülethez közeli sávokban dúsulnak. Itt, a felületközeli zónában viszont a C-tartalom 0,037%-ra csökkent a SPECTRO-TEST-es mérés szerint. A szén mellett a Si, a Mn és a kén szinte teljesen kiegészít, és a P-tartalom is

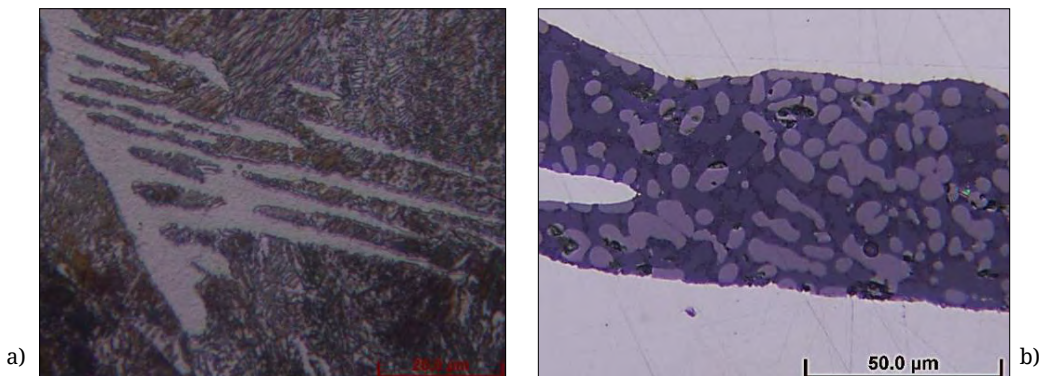
csak 0,079 %. Az összetevők kiegészése és a jelentős mértékű salakosság arra utal, hogy a kovácsolást egészen nagy hőmérsékleten és hosszan tartó izzítással végezték, a felületet pedig nem tudták rendszeresen megvédeni a revésedéstől.

c) A kovácsolás okozta képlékeny alakváltozás mértéke jelentős volt.

d) A végső hőkezeltségi állapot a dekarbonizálódott részekben a teljes lágyításnak felel meg (**8.c ábra**), a kb. 12 mm vastag minta nagy C-tartalmú rétegeiben (**9.a ábra**) pedig a nem túl erős hűtés hatására kialakuló, tús ferrites és finomlemezes perlites szerkezetnek. A **9.b ábrán** egy vastag salakréteg belső szerkezete látható, a minta polirozott (maratlan) állapotában.



**8. ábra.** Az acélmaradék-minta mikroszerkezete a vastagság mentén kialakult egyes sávokban (marószers: Nital-4)



**9. ábra.** a) Az acélmaradék-minta mikroszerkezete a nagy C-tartalmú rétegben (marószér: Nital-4);  
b) A salakzárvány mikroszerkezete polikristályos állapotban

## 5. Következtetések

Ez a munkánk az első kísérlet a 16. században működő csíkmadarasi vasgyártás telephelyének rekonstruálására, a hámor termékeinek anyag-tudományi módszerekkel való jellemzésére. Az elemzések arra utalnak, hogy a felhasznált vasérc, a sziderit, nem egyedüli ásványként volt jelen egy komplex érchen, hanem andezittufák, mészkő és dolomit, kristályos palák stb. kísérték. Ezekből származnak azok az elemek, amelyek a csíkmadarasi vas összetételét egyedivé teszik.

A leletek összetételének és szövetszerkezetének vizsgálata azt mutatja, hogy a csíkmadarasi hámor acéltermékeire – mai szemmel nézve – összetételben és szövetszerkezetben egyaránt jelentős mértékű inhomogenitás jellemző. Ez nyilvánvalóan kihatott a termékek mechanikai tulajdonságaira is, de nagyon valószínű, hogy az adott kor technológiai lehetőségei nem is nagyon tettek lehetővé jobb minőségű anyagot az akkori tömegtermékek gyártásában.

A hámor 170 éven át tartó működése alatt jelentős mennyiségű, értékes elemeket tartalmazó (Zn, Ni, Sb stb.) salak halmozódott fel, amelyből ezen elemek kinyerése időszerű feladattá válhat.

## Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Guran M.: *Fierul*. Editura Tehnică, București, 1978.
- [2] Szakács A.: *The siderit of the neogene volcanism-related ironores in the East Carpathians (Romania)*. Mineralogy and chemical features. Romanian Journal of Mineralogy, 75/1. (1992).
- [3] Latinák Gy.: *A vajdahunyadi m. kir. vasgyár és tartozékai I–IV*. Bányászati és Kohászati Lapok, 39/2. (1906) 2–48, 73–99, 137–172, 203–242.
- [4] Jakab Gy.: *Székelyföld érctelepei*. Tanulmányok Erdély földtanából. Földtani közlöny, 135/3. (2005) 459–478.
- [5] Pataki J.: *A csíki vashámor a XVII. század második felében*. Csíkszereda, 1971. 48–54.
- [6] Orbán Balázs: *Székelyföld leírása I*. Pest, 1863, Csíkszék, 57–72.
- [7] Rousseau R. M.: *Detection limit and estimate of uncertainty of analytical XRF results*. The Rigaku Journal, 18/2. (2001) 33–47.
- [8] Kadachi A. N., Al-Eshaikh M. A.: *Limits of detection in XRF spectroscopy*. X-ray Spectrometry, 41/5. (2012) 350–354.  
<https://doi.org/10.1002/xrs.2412>
- [9] Borkhodoev V. Y.: *Estimation of limits of detection and determination in X-ray fluorescence analysis by the dependence of the relative standard deviation on analyte concentration*. Journal of Analytical Chemistry, 71/9. (2016) 872–877.  
<https://doi.org/10.1134/S1061934816070054>
- [10] Liss B., Levy T. E.: *Using X-Ray Fluorescence to Examine Ancient Extractive Metallurgy Practices: A Case Study from Iron Age Khirbatal-Jariya, Jordan*. Journal of Powder Metallurgy & Mining, 5/1. (2016) 1–5.  
<https://doi.org/10.4172/2168-9806.1000140>
- [11] Renkó J. B., Kemény D. M., Nyirő J., Kovács, D.: *Comparison of cooling simulations of injection moulding tools created with cutting machining and additive manufacturing*. MaterialsToday: Proceedings, 12. (2019) 462–469.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.150>



# A hőkezelés hatása a szerszámacélok szövetszerkezetére és kopási viselkedésére

## Examination of Heat Treatment on the Microstructure and Wear of Tool Steels

Fábián Enikő Réka,<sup>1</sup> Tóth László,<sup>2</sup> Huszák Csenge<sup>3</sup>

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

<sup>1</sup> [fabian.reka@bgk.uni-obuda.hu](mailto:fabian.reka@bgk.uni-obuda.hu)

<sup>2</sup> [toth.laszlo@bgk.uni-obuda.hu](mailto:toth.laszlo@bgk.uni-obuda.hu);

<sup>3</sup> [huszak.csenge@bgk.uni-obuda.hu](mailto:huszak.csenge@bgk.uni-obuda.hu)

### Abstract

The microstructure of the investigated X153CrMoV12 grade tool steel in delivered condition consisted of spheroidal matrix and primary carbides. The primary carbides were not dissolved under austenitisation time on either 1030°C or 1070°C. The microstructure and abrasion resistance of the steel changed due to quenching from different austenitisation temperatures. After conventional quenching from the higher austenitising temperature, there is more residual austenite in the steel than at quenching from the lower austenitisation temperature, which decreased the wear resistance. As a result of quenching from 1070°C followed by a multiple tempering process around 500 to 540°C, the retained austenite content is reduced and finely dispersed carbides are precipitated in the matrix, resulting in a higher matrix hardness and an increased wear resistance. After cryogenic treatment, the residual austenite content decreases compared to the conventional process, which leads to an increase in hardness and wear resistance.

**Keywords:** *tool steel, austenitisation, residual austenite, precipitation, cryogenic treatment, wear resistance.*

### Összefoglalás

A vizsgált, X153CrMoV12 minőségű szerszámacél szövetszerkezetét szállítási állapotban szferoidites mátrix és hálós elrendezésű primer karbidok alkották. A primer karbidok nem mentek oldatba sem 1030 °C, sem 1070 °C-on való hűtést alatt. Az acélt különböző ausztenitesítési hőmérsékletekről edzve változott annak a szövetszerkezete és kopásállósága. A nagyobb ausztenitesítési hőmérsékletre való hagyományos edzés után több a maradék ausztenit az acélban, mint a kisebb ausztenitesítési hőmérsékletre való edzéskor, mely fázis erőteljesebb kopáshoz vezet. Az 1070 °C-on való ausztenitesítésről való edzést követő többszörös, 500–540 °C körüli megeresztés hatására a mátrixban finom diszperz karbidok válnak ki, miközben csökken a maradékausztenit-tartalom és nő a mátrix keménysége. Amennyiben az edzés mélyhűtéssel végződik, a maradékausztenit-tartalom csökken a hagyományos eljáráshoz képest, ami a keménység és kopásállóság növekedéséhez vezet.

**Kulcsszavak:** *szerszámacél, ausztenitesítés, maradék ausztenit, kiválás, mélyhűtés, megeresztés, kopás.*

### 1. Bevezetés

Az X153CrMoV12 minőségű acélt a felhasználók előszeretettel használják vágó-, kivágószerszám alapanyagaként, ollók, kések gyártására, hajlító-,

húzó-, mélyhúzó és hidegfolyató szerszámnak, menethengerlő szerszámnak, kerámia- és gyógyszeripari prészerszámokhoz, hidegalakító hengerek gyártására, papír, műanyag, fa, bőr, gumi,

textilanyagok vágószerszámaként, valamint nagy kopásállóságú műanyag-alakító formák és betétek gyártására is. Ezt az acélt az acélforgalmazók lágyított állapotban forgalmazzák, ekkor a keménysége max. 250 HBW lehet. Ebben az állapotban, az erőteljes ötvözöttség ellenére is, aránylag könnyen megmunkálható. A kész szerszám tulajdonságait a végső hőkezelés után éri el. Annak ellenére, hogy az X153CrMoV12 minőségű acélt számos helyen használják, a hőkezelésre vonatkozó ajánlásokban akadnak különbségek. Kis méretváltozás és nagy keménység általában 930–960 °C-ról hűtve érhető el [1]. 1100 °C-ról hűtve szekunder keményedés figyelhető meg az anyagban, a keménységmaximum 520–530 °C-on való megeresztéskor jelenik meg. A szabvány [2] az edzéshez 1020 °C-t ajánl, hűtést pedig levegőn. A megeresztési hőmérsékletre nézve a szabvány szerint a 970 °C-ról való hűtést követő 200 °C alatti megeresztéskor lehet 62 HRC fölötti keménységet elérni.

A szerszámacélok, gyorsacélok és különleges alapanyagok területén a Voestalpine a világ legjelentősebb gyártói közé tartozik. A cég kiadványa 1030 °C-ról való edzés után szekunder keményedésről nem mutat adatokat, viszont 1070 °C-ról való edzés után 520 °C-nál szekunder keményedésre lehet számítani, ezért esetleges nitridálás előtt kétszeres megeresztést ajánlanak ezen a hőfokon [3]. Az Inter Alloy cég háromszoros megeresztést ajánl 500–550 °C-on [4]. Mélyhűtésről a cégek nem tesznek említést, mint ahogy a szabvány sem, noha ilyen karbantartalomnál szobahőmérsékletig való hűtéskor a martenzites átalakulás nem fejeződik be [5]. Miközben cégek adatai nem utalnak a kopásállóság és hőkezelési változók közti összefüggésekre, a mélyhűtésnek és a megeresztéseknek a mechanikai, illetve a kopási tulajdonságokra gyakorolt hatásával több kutató is foglalkozik hasonló hidegalakító szerszámacéloknál [6–11]. A felhasználók a hőkezelőnek a szerszámon mért Rockwell-keménységet írják elő. Viszont a szerszám élettartama, kopásállósága, szívóssága azonos Rockwell-keménység esetén is változhat.

## 2. Vizsgálati anyagok és módszerek

A vizsgált, X153CrMoV12 minőségű acél vegyi összetétele az 1. táblázatban látható.

A 20×40×20 mm-es minták ausztenitesítését 1030 °C-on, illetve 1070 °C-on végeztük Ipsen VFC típusú, 300×370×200 mm kamraméretű, vákuumkemencében kétlépcsős (650 °C, illetve 900 °C) hőn

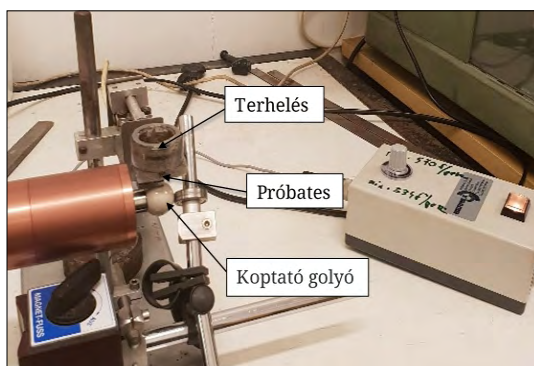
1. táblázat. A vizsgálati anyag kémiai összetétele spektrométeres mérés alapján; az ötvözők tömegaránya %-ban

C	Cr	Mo	V	Si	Mn	Fe
1,67	11,25	0,837	1,41	0,364	0,422	többi

tartást követően. Az edzést néhány mintadarabon áramló nitrogéngázzal végeztük 40 °C-ig hűtve a mintákat, néhány mintát mélyhűtöttünk -80 °C-os gáz halmazállapotú nitrogénben, 3 óra időtartamban. Mind a mélyhűtött, mind a hagyományos eljárással edzett mintáknál vizsgáltuk azok tulajdonságváltozásait különböző hőkezelési hőmérsékleteken való egyszeri, illetve többszöri megeresztés után.

A kísérleti mintákat metallográfiai előkészítés után Olympus PMG3 típusú fémmikroszkópon, illetve Jeol JSM 5310 típusú pásztázó elektron-mikroszkópon (SEM) vizsgáltuk. A karbidok eloszlását és a kialakult szövetszerkezetet, szemcseméretet elsődlegesen nitálos maratás után néztük, a maradék ausztenit meghatározásához a legalkalmasabbnak a Beraha'2 marószert (85 ml víz, 15 ml HCl, 1 g K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) bizonyult. Beraha'2 reagenst használva, maratás után a karbidok és az ausztenit világos marad, a többi szövetelemen vékony szulfidréteg képződik. A primer karbidok egyértelműen elkülöníthetőek a mátrixtól. A mátrixban kiválásként megjelenő karbidok gömbszerűek, így azokat is meg lehet különböztetni a maradék ausztenittől. A karbidok és a különböző hőkezelések után kialakuló mátrix keménységét Buhler 1105 típusú Vickers-keménységmérővel mértük.

Kopásvizsgálathoz saját fejlesztésű, forgó golyós kopatóberendezést használtunk [12] (1. ábra). A kopatógolyó 20 mm átmérőjű Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> anyagú, polírozott felületű kerámigolyó volt, a terhelőerőt a minták tömege mellett 50 g-os nehezék szolgáltatta.



1. ábra. A kopatóberendezés

Kopási mérőszámként a kopási tényezőt ( $K$ ) használtuk, mely a kopási térfogattól ( $V_v$ ), a kopási úthosszból ( $s$ ) és a terhelőerőből ( $F$ ) számolható:

$$K = \frac{V_v}{s \cdot F} \text{ (mm}^3\text{)/(m} \cdot \text{N)} \quad (1)$$

A kopási térfogat a kopásnyom átmérőjéből ( $d$ ) és a gömbsüveg magasságából ( $h$ ) számolható:

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

A koptatott gömbsüveg magassága a koptatógolyó  $R$  sugarából és a kopási lenyomat átmérőjéből egyszerű összefüggéssel számolható:

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

A kopási úthossz ( $s$ ) a koptatási időtől ( $t$ ), a koptatógolyó sugarától és annak fordulatszámától ( $n$ ) függ (4):

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

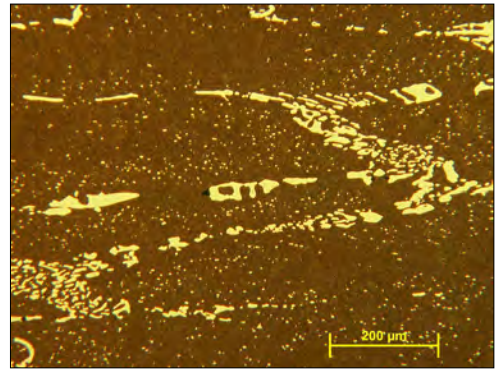
A szakirodalmi adatokkal való összehasonlíthatóság érdekében [11–12] a fordulatszámot 570 fordulat/percre állítottuk, és a koptatóvizsgálat 5 percig tartott.

### 3. Vizsgálati eredmények

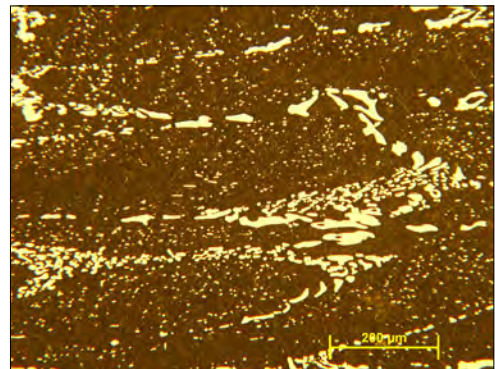
A vizsgálni kívánt X153CrMoV12 minőségű szerzőszám-cél keménysége szállítási állapotban átlagosan 248 HV 1 volt, szövetszerkezetét sferoidites mátrix és hálós elrendezésű primer karbidok alkották. A voestalpine Hungary Kft. ajánlása szerint végzett edzést megelőző ausztenitesítés hőmérséklete erősen befolyásolja az edzett anyag szövetszerkezetét és keménységét.

#### 3.1. Az edzési hőmérséklet hatása

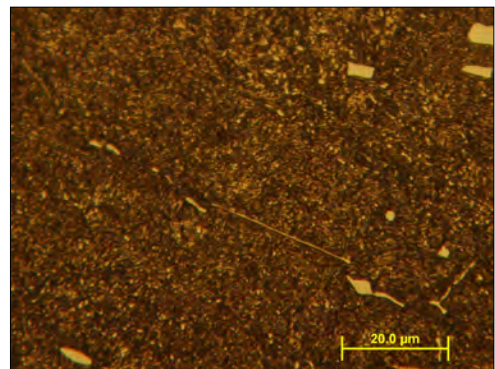
Vizsgálva a minták szövetszerkezetét azt tapasztaltuk, hogy a primer karbidok nem mentek oldatba 1070 °C-on való hőntartás alatt sem, ahogy azt a 2. ábra a) és b) felvételein láthatjuk. Eközben a nagyobb ausztenitesítési hőmérsékletre való edzés több maradék ausztenitet eredményezett, mint az 1030 °C-ról való hűtéskor, ahogy azt a 2. ábra c) és d) felvételei is mutatják. A szövetszerkezeti vizsgálatokkal teljesen összhangban vannak a keménységmérési és kopásvizsgálati eredmények. Amely mintát 1030 °C-ról hűtöttük, annál a mátrix keménysége átlagosan 674 HV 1, míg az 1070 °C-ról hűtött mintánál 648 HV 1.



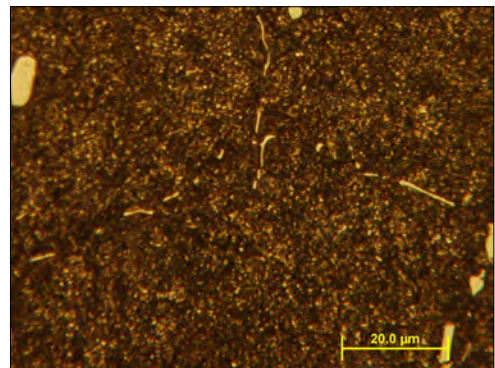
a)



b)



c)



d)

2. ábra. Az edzési hőmérséklet hatása a szövetszerkezetre; fémmikroszkópos felvétel. Marószerszer: Beraha-2. a)  $T_{\text{auszt}} = 1030 \text{ °C}$  b) d)  $T_{\text{auszt}} = 1070 \text{ °C}$



Az edzési hőmérséklet emelésével a kopási tényező  $2,46 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ -ról  $2,94 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ -re nőtt a nagyobb ausztenittartalomnak köszönhetően. A maradék ausztenit eloszlása minden esetben egyenletes a mátrixban. A primer karbidok hasonló megjelenése az  $1030 \text{ }^\circ\text{C}$ -ról, illetve az  $1070 \text{ }^\circ\text{C}$ -ról induló edzések után magyarázatul szolgál azon jelenségre, hogy az edzés után mért Rockwell-keménység majdnem egyforma (2. táblázat).

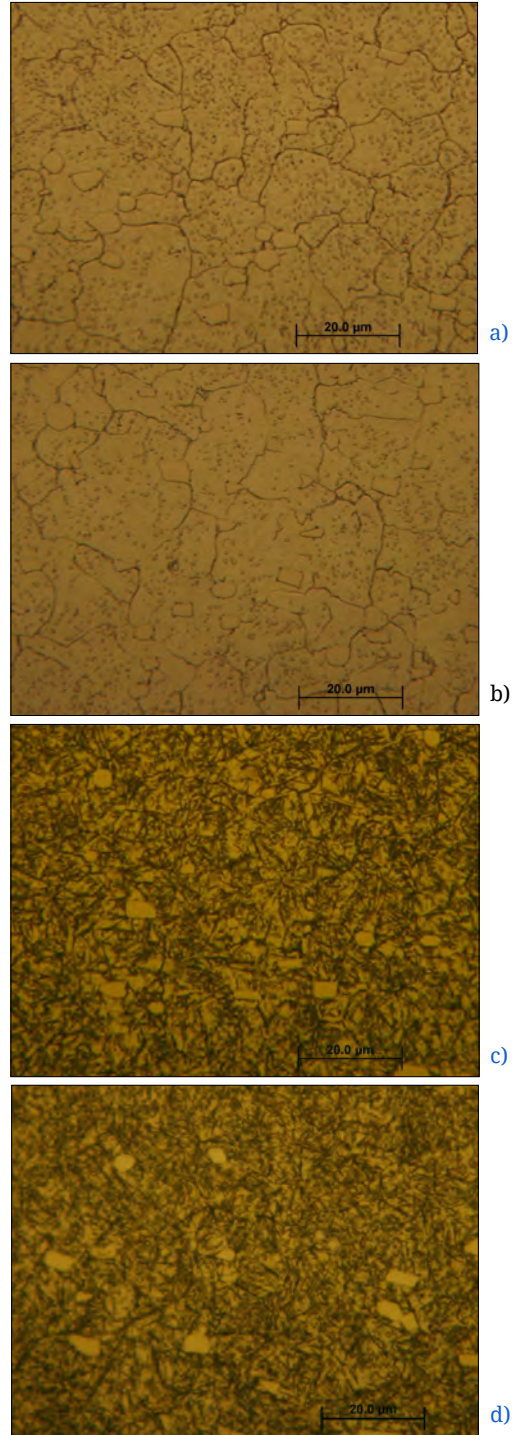
2. táblázat. A hőkezelési paraméterek hatása a keménységre és a kopásra

Edzés		Megeresztés ( $^\circ\text{C}$ )			HRC	HV 1	K ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ )
$T_A$ ( $^\circ\text{C}$ )	HRC	T1	T2	T3			
1030	62	–	–	–	62	674	$2,46 \cdot 10^{-5}$
1030	62	200	–	–	61	668	$1,56 \cdot 10^{-5}$
1070	62	–	–	–	62	648	$2,94 \cdot 10^{-5}$
1070	62	200	–	–	61	641	$1,04 \cdot 10^{-5}$
1070	61	520	–	–	60	663	$2,22 \cdot 10^{-5}$
1070	61	520	540	–	59	685	$3 \cdot 10^{-5}$
1070	61	520	540	500	59	748	$2,46 \cdot 10^{-5}$

### 3.2. Az edzés utáni megeresztés hatása

Az  $1070 \text{ }^\circ\text{C}$ -os ausztenítés után végzett edzés követő megeresztés hőmérséklete és ciklusszáma jelentősen befolyásolja az X152CrMoV12 acél szövetszerkezetét, keménységét és kopási tulajdonságait. Ha edzés után  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ -on eresztjük meg a mintát, a martenzites mátrixban nagyon kicsi a finom, diszperz eloszlású karbid mennyisége [3. ábra b), 4. ábra a) felvétel]. A megeresztési hőmérsékletet  $520 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra emelve a martenzites szövetben számos finom, diszperz kiválás jelenik meg, de még maradék ausztenit is felfedezhető, ahogy azt a 3. ábra c) felvétele, illetve a 4. ábra b) felvétele is mutatja. Többszörös, nagy hőmérsékletű megeresztés hatására a martenzites mátrixban egyre több finom, diszperz karbid válik ki, miközben csökken a maradékausztenit-tartalom, ahogy azt a 3. ábra c), d) és a 4. ábra c), d) felvételei is mutatják. A primer karbidok jellege erőteljesen nem változik.

Az  $500\text{--}550 \text{ }^\circ\text{C}$ -os megeresztés hatására bekövetkező szövetszerkezeti változások növelik a mátrix keménységét. A többszörös megeresztés hatására  $500\text{--}550 \text{ }^\circ\text{C}$  környékén a mátrix keménysége a  $750 \text{ HV } 1$ -et is eléri (2. táblázat).

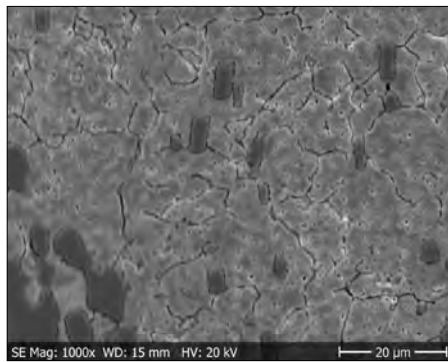


3. ábra. A megeresztési hőmérséklet hatása a szövetszerkezetre; fémmikroszkópos felvételek.

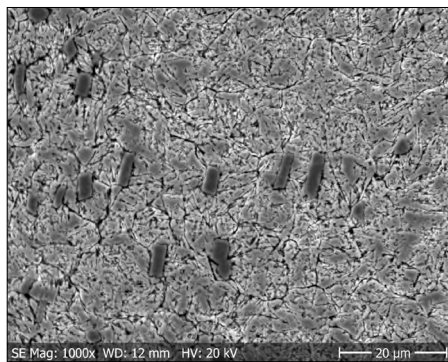
$T_{\text{auszt}} = 1070 \text{ }^\circ\text{C}$ . Marószér: 2% nitál.

a) edzett, b)  $T_{\text{meger}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ , c)  $T_{\text{meger}} = 520 \text{ }^\circ\text{C}$

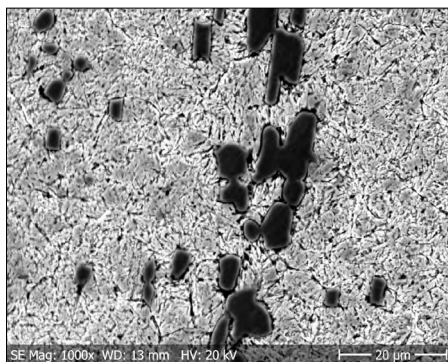
d)  $T_{\text{meger}} = 520 \text{ }^\circ\text{C} + 540 \text{ }^\circ\text{C} + 500 \text{ }^\circ\text{C}$



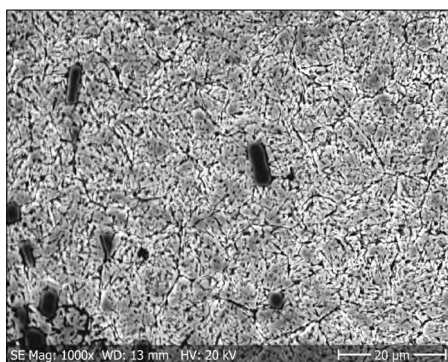
a)



b)



c)



d)

**4. ábra.** A megeresztési hőmérséklet hatása a szövetszerkezetre. SEM-felvételek. Marószér: nitál. a)  $T_{meger} = 200\text{ °C}$ , b)  $T_{meger} = 520\text{ °C}$ , c)  $T_{meger} = 520\text{ °C} + 540\text{ °C}$ , d)  $T_{meger} = 520\text{ °C} + 540\text{ °C} + 500\text{ °C}$

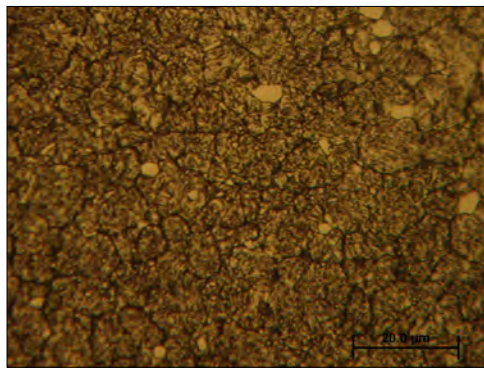
### 3.3. A mélyhűtés hatása

Azon alkatrészeknél, melyeket esetleg nitridálni szeretnénk, szükséges a nagy hőmérsékletű megeresztés [1, 3]. Nitridált terméknel jellemzően igénylik a méretpontosságot, tehát nem megegyezhet a sok maradék ausztenit. Vizsgálataink során azt tapasztaltuk, hogy az edzés során mélyhűtött darab maradékausztenit-tartalma már az egyszeri nagy hőmérsékletű megeresztés után is kevés a nem mélyhűtött mintához viszonyítva (5.a ábra, 2.c ábra), a háromszoros emelt hőmérsékletű megeresztés a maradék ausztenit mennyiségét tovább csökkenti (5. ábra).

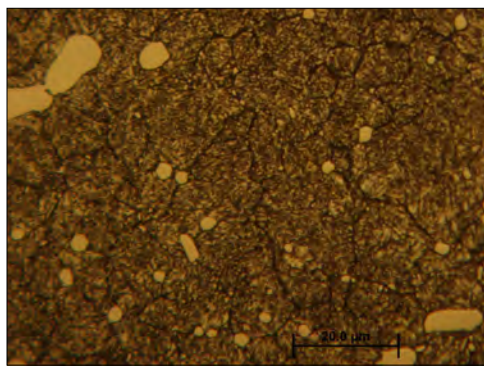
A mélyhűtés nemcsak a mátrix keménységét növelte meg, de a kopási tényezőre gyakorolt pozitív hatása egyértelműen kimutatható (3. táblázat).

### 4. Összegzés

Az ausztenitesítési hőmérséklet emelésével edzés után csökken a martenzites mátrix keménysége, a maradék ausztenit növekedő mennyiségének köszönhetően. A többszöri, nagy hőmérsékletű megeresztés az 1070 °C-ról edzett



a)



b)

**5. ábra.** A mélyhűtés hatása a szövetszerkezetre.

Fémmikroszkópos felvételek

Maratás: nitál,  $T_{edzés} = -80\text{ °C}$  a)  $T_{meger} = 510\text{ °C}$ , b)  $T_{meger} = 510\text{ °C} + 480\text{ °C} + 480\text{ °C}$



### 3. táblázat. A mélyhűtés hatása a mátrixkeménységre és -kopásra

Ausztentési- tés (°C)	Hűtés (°C)	Megeresztés (°C)				HV1 mátrix	Kopási tényező (mm <sup>3</sup> /Nm)
		T	T1	T2	T3		
1070	20	510	–	–	663	4,29·10 <sup>-5</sup>	
1070	-80	510	–	–	746	2,66·10 <sup>-5</sup>	
1070	20	510	480	480	695	3,00·10 <sup>-5</sup>	
1070	-80	510	480	480	738	2,24·10 <sup>-5</sup>	

minta keménységét növeli, részben a maradék-auszténit-tartalom csökkenésének, részben a finom diszperz kiválásoknak köszönhetően. Mélyhűtés hatására a maradék auszténit mennyisége teljesen lecsökken, a kopásállóság nő.

#### Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton kívánnak köszönetet mondani a munkájukhoz nyújtott anyagi támogatásért az EFOP-3.6.1-16-2016-00010. számú projekt keretében a magyar államnak és az Európai Uniónak.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Smóling K., Czeglédi L.: *Szerszámacélok kézikönyve*. Szabvány Kiadó, Budapest, 1977. 94–95.
- [2] MSZ EN ISO 4957: 2018. *Szerszámacélok*
- [3] Voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG: *Szerszámacélok, nemesacélok*, 45. <http://www.boehler.hu/media/productdb/downloads/K110DE.pdf> (letöltve: 2019. 01.28)
- [4] Inter Alloy Engineering Steels and Alloys: Product datasheets, Tool steel D22011 Inter-alloy Pty Ltd <http://www.interalloy.com.au/our-products/tool-steel/d2-tool-steel-x153crmov12> (letöltve: 2019. 02.15)
- [5] Capdevila C. et al.: *Determination of Ms temperature in steels: A Bayesian Neutral Network Model*. ISIJ International 42. (2002) 894–902. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.894>
- [6] 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>
- [7] 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>
- [8] 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. (2001) 350–355. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(01\)00973-6](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(01)00973-6)
- [9] Das D., Sarkar R., Dutta A. K., Ray K. K.: *Influence of sub-zero treatments on fracture toughness of AISI D2 steel*. Materials Science Engineering A, 528. (2010) 589–603. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.057>
- [10] Das D., Dutta A. K., Ray K. K.: *Sub-zero treatments of AISI D2 steel: part II. Wear behaviour*. Materials Science and Engineering A, 527. (2010) 2194–2206. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.10.071>
- [11] 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>
- [12] Kovács T., Dévényi L.: *Kopásvizsgálati eljárás fejlesztése*. Anyagok világa, 5/1. (2004) [https://www.kfki.hu/~anyag/tartalom/2004/dec/05\\_KT\\_DL.pdf](https://www.kfki.hu/~anyag/tartalom/2004/dec/05_KT_DL.pdf)

# Auszténites korrózióálló acélok lézersugaras vágása

## Laser Cutting of Austenitic Corrosion-Resisting Steels

Halász Gergely,<sup>1</sup> Fábíán Enikő Réka,<sup>2</sup> Kuti János<sup>3</sup>

Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország

<sup>1</sup> [gerryhalasz@gmail.com](mailto:gerryhalasz@gmail.com)

<sup>2</sup> [fabian.reka@bgk.uni-obuda.hu](mailto:fabian.reka@bgk.uni-obuda.hu)

<sup>3</sup> [kuti.janos@bgk.uni-obuda.hu](mailto:kuti.janos@bgk.uni-obuda.hu)

### Abstract

Nowadays, laser technology has become an essential part of our lives. The great advantage of lasers used in materials processing is that they provide very precise, quick machining and low heat input. However, all machining requires unique parameters. These parameters are for example: Power, wavelength, cutting speed and focus line distance. Using optical microscopes and electron microscopes to examine the cutting surfaces of the CO<sub>2</sub> laser, we can see that the cut has high quality surface (cutting 3,25 mm thick plates), but holes made with a solid-state laser have micro-cracks on the inner side. These cracks are not acceptable to the customers.

**Keywords:** *laser cutting, austenitic stainless steel, CO<sub>2</sub> laser, solid-state laser.*

### Összefoglalás

Az auszténites korrózióálló acélok koronglézersugaras berendezéssel való vágása nagyobb anyagvastagság mellett nem teljesen kidolgozott. Kutatásainkban 3,25 mm vastagságú korrózióálló acélon létrehozott furatok felületét vizsgálom CO<sub>2</sub>-lézerberendezéssel és koronglézersugaras berendezéssel vágva. Fénymikroszkópos és elektronmikroszkópos vizsgálatokkal ellenőrizve a vágási felületeket azt tapasztaltuk, hogy CO<sub>2</sub>-lézerrel vágva a korrózióálló auszténites lemezeken jó minőségű vágási felület keletkezik, azonban szilárdtestlézerrel vágott furat belső felületén mikrorepedések jelentek meg, melyek nem megengedhetők.

**Kulcsszavak:** *lézersugaras vágás, auszténites acél, CO<sub>2</sub>-lézer, szilárdtestlézer.*

### 1. Bevezetés

A 20. század egyik nagy vívmánya a lézer felfedése volt, mely új távlatokat nyitott számos tudományágban. Az anyagmegmunkálás területén alkalmazott lézerek nagy előnye a többi eljárással szemben, hogy nagyon pontos, gyors megmunkálást és csekély hőbevitelt biztosít, azonban minden megmunkálás egyedi paraméterek beállítását igényli. Ilyen paraméterek például: a teljesítmény, hullámhossz, vágási sebesség, fókuszávolság. A CO<sub>2</sub>-lézerrel végzett vágásokkal számos kutató foglalkozott. Az auszténites korrózióálló acélok lézersugaras vágása bizonyos vastagság fölött nem teljesen kidolgozott. Az utóbbi években a szállézeres teljesítményének erőteljes

növelésével sikerült nagy vastagságú korrózióálló acéllemezt elvágni, Seon és társai 9 kW-os szállézerrel 60 mm-es vastagságot sikerült elvágni, de a felület nagyon salakos [1]. Külön problémát jelent a vastag acélok ívelt vágása [2, 3]. Berkmanns és Faerber a teljesítmény mellett az íveltség hatását is vizsgálja a vágott felület minőségére [2]. Parthiban és társai vágással megfelelő minőségű ívelt felületet 2,5 mm vastagságú, X5CrNi18-10 típusú anyagon CO<sub>2</sub> típusú lézersugaras berendezéssel tudtak elérni [3].

Kotadiya és társai tanulmányozták a lézersugaras vágás paramétereinek hatását a felületi érdességre. A szerzők úgy találták, hogy CO<sub>2</sub>-lézersugaras berendezésnél mind a teljesítmény, mind a gáznyomás jelentősen befolyásolja a felületi ér-

dességet [4], míg szállézersugaras berendezésnél a lézersugár-teljesítmény és a vágási sebesség a meghatározó az általunk is vizsgált korrózióálló acélokánál [5].

A lézersugárral vágott furatok felületének minőségi követelményei az alkatrészek felhasználásának függvényében változik. Az általunk vizsgált alkatrészeknek igen szigorú követelményeknek kell megfelelniük, mert a továbbiakban gázturbinákban lesznek alkalmazva. A vágásokat CO<sub>2</sub>-lézerrel és szilárdtestlézerrel végeztük el. A CO<sub>2</sub>-lézernél korábban a cég által jóváhagyott referenciaparamétereket használtunk, míg a szilárdtestlézernél általunk választott paraméterekkel dolgoztunk, mivel a folyamatváltozók megfelelő értékei még nincsenek kidolgozva. A CO<sub>2</sub>-lézeres vágásnál a vágási rés felülete megfelelt az előírtaknak, azonban a szilárdtest-lézeres vágást tekintve a repedések száma meghaladta a megrendelő által megszabott maximális repedésmennyiség értékét. A kutatásunk célja a próbavágások alkalmával készített furatok felületének vizsgálata és a beállított paraméterek értékelése.

## 2. A lézer

A lézert sugárzásként tekintve annak alapja a stimulált emisszió, amely a lézermédiumban megy végbe, amikor egy, már gerjesztett állapotban lévő atomot egy újabb foton talál el, és az érkező foton magával ragadja a gerjesztett atom addig fogott fotonját, s közösen, az érkezés irányával párhuzamosan haladnak tovább. A lézersugár a rezonátorban jön létre; itt található a lézermédium, a gerjesztő, a záró és féligáteresztő tükrök. A médium lehet szilárd, folyékony vagy gáz közeg is. A stimulált emisszió alapfeltétele, hogy több atom legyen gerjesztett állapotban, mint nem gerjesztett állapotban, ezt nevezzük populációinverzióknak [6].

### 2.1. A szén-dioxid-lézer

Az iparban az egyik legelterjedtebb lézerberendezés a CO<sub>2</sub>-lézer, amit elsősorban vágásra és hegesztésre használtak. Az elsők között alkalmazott, nagy teljesítményű, ipari célra használt lézerek CO<sub>2</sub>-lézerek voltak. A lézermédium ebben az esetben gázkeverék, mely kvarcüveg csövekben áramlik. A csöveken kívül elektródák segítségével gerjesztik a gázt érintkezés nélkül. A felhasznált lézergázt szén-dioxidból, héliumból és nitrogénből keverik megfelelő arányban. A keletkező lézersugár/lézersugárzás hullámhossza  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$  [7].

### 2.2. A szállézer

A szállézer egy összetett, de mégis igen hatékony szilárdtestlézer; a rúdlézerek kedvezőtlen gerjesztési tulajdonságainak megkerülése végett hozták létre. Szilárdtestlézernek minősül, hiszen a lézermédium itt is szilárd, ritkaföldfémmel adalékolt kvarcüveg, amelyben az ionrácsba juttatott idegen atomok gerjesztésével hozzák létre a nagy teljesítményű lézersugarat. A médium egy vékony üvegszál, amely 8–10  $\mu\text{m}$  átmérőjű. Ennek a belső magnak a legnagyobb a törésmutatója, ezt veszi körül egy bevonat, amelynek a törésmutatója kisebb. A bevonatban halad a gerjesztést végző, kis teljesítményű lézersugár, amely diódalézerből származik. Az úgynevezett külső köpeny, melynek a törésmutatója a legkisebb, gondoskodik arról, hogy a gerjesztést végző lézer ne jusson ki. A gerjesztő lézersugárzás könnyedén belép a magba, azonban kilépni már nem tud ilyen könnyen, az indukált emisszióval létrehozott nyalábnak pedig szinte lehetetlen kijutnia. A sugár visszaverésére itt zárótükrök helyett úgynevezett Bragg-rácsot alkalmaznak, amelyet a szál magjának két végén hoznak létre az optikai tengelyre merőlegesen. Ezekben a sávokban (rácsvonalakban) a törésmutató különbözik a mag törésmutatójától, és a sávok periodikusan változó vastagságúak [7].

### 2.3. A koronglézer

A koronglézernél a hajszálvékony szál helyett lapos, vékony, kör alakú korongot használnak lézermédiumnak. A gerjesztő diódalézerből származó lézersugarat tükrök segítségével többször átvezetik a lézermédiumon, így populációinverziót idézve elő. A gerjesztett lézernyalábot ezután kivezetik, és optikai kábellel vezetik a megmunkálás helyére. Az így előállított sugárzás sugárminősége eléri a CO<sub>2</sub>-lézerét, és nagyobb hatékonyságot biztosít. Ezzel együtt a koronglézernek is megvan a szállézer nagy előnye: optikai kábellel továbbítható a lézersugár. A koronglézer hullámhossza  $\approx 1 \mu\text{m}$ , ami azt jelenti, hogy egy nagyságrenddel kisebb, mint a CO<sub>2</sub>-lézernek [7]. Ez fontos szerepet játszik a hőbevitel szempontjából, és az elvégzett vizsgálatok eredményét döntően befolyásolja. A technológiai változók alkalmazott értékeit ehhez mérten állítottuk be.

## 3. A kísérletek ismertetése

A vizsgált anyag X5CrNi18-10 típusú, ausztenites korrózióálló acél. A próbavágásokat 3,25 mm vastag lemezen végeztük el. Az első referenciavágás TruFlow 4000 típusú, 4 kW-os szén-dioxid-lézer-

rel, a további vágások pedig Tru-Disk 3000 típusú, 3 kW-os koronglézerral készültek.

A furatfelületet elsőként szemrevételezéssel vizsgáltuk a vágások után közvetlen, majd a furatok belső felületét és a peremét Dino-Lite Digital hordozható fénymikroszkóp segítségével. A lézervágott felületek részletes vizsgálatát, esetleges hibáit Jeol JSM 5310 típusú pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) tártuk fel.

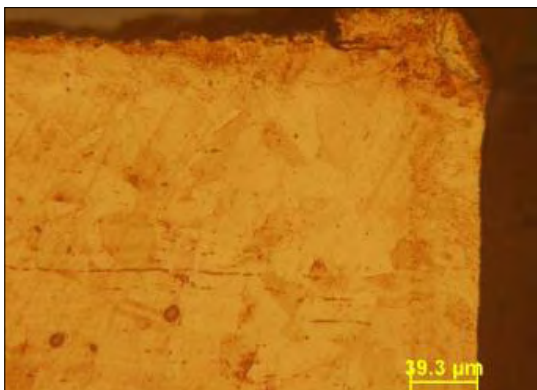
#### 4. Vizsgálati eredmények

Először egyszerű, hordozható fénymikroszkóp segítségével készítettünk képeket a furat felületéről, hogy a későbbi vizsgálatoknak tudjunk alapot adni. Ezekon a képeken jól látszik a lézersugár ki- és belépési pontja, a fókuszolt helye és a peremeken a fröcskölés, továbbá a furat alsó peremén látható az úgynevezett tapadósalak, ami az alapanyaghoz kötődő vas-oxid, azonban repedések ezeken a képeken nem láthatók.

Az **1. ábrán** jól látható tapadósalak a furat peremén jellegzetesen a CO<sub>2</sub>-lézerral vágott mintadarab felületén látszódott. Ezeknél a vágásoknál a cég által korábban elfogadott referenciaparamétereket használtam, melyeket már meglévő alkatrészek gyártására alkalmaznak. A metallográfiai 40 μm körüli egyenletes megolvadt zónát mutat (**2. ábra**), amely helyenként



**1. ábra.** Visszatapadó vas-oxidok CO<sub>2</sub>-lézerral vágva (φ 6,2 furat)



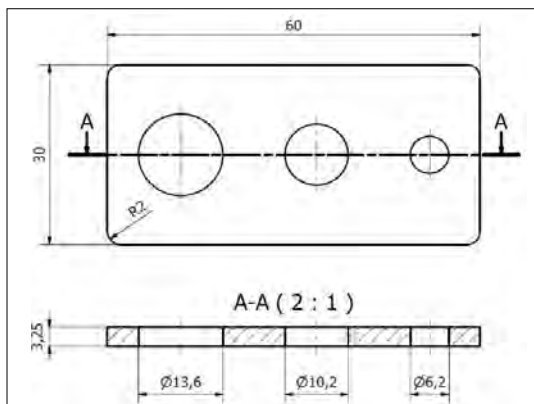
**2. ábra.** A furat felülete közeli zónája CO<sub>2</sub>-lézersugaras vágás után. Marószerszám: királyvíz

közel azonos mértékben túlfolyva dermedt meg a vágás irányának megfelelően.

Ezzel szemben a koronglézerral vágott daraboknál ilyen mértékű visszatapadó salak nem jelentkezett. Első ránézésre és tapintásra a furat pereme durva, azonban a belső felületének érdessége megfelelő.

A referenciavágás után következtek a vágások koronglézerral. A próbavágások során az energiabevitel csökkentésével változtattuk a paramétereket. Különböző sebességgel és energiával készítettük el a **3. ábrán** látható furatokat. A jóval kisebb hullámhossz miatt az anyagban elnyelt hő nagyobb volt, mint azonos paraméterek alkalmazásánál CO<sub>2</sub>-lézernél, ezért érezhetően gyorsabb volt a koronglézerral való vágás. Termelékenység szempontjából ez igen fontos. Az elkészült darabokon elsőre jól látható, hogy a furatperem felületi érdessége jobb, a szemrevételezéses vizsgálat során a darab minősége a referenciadarab felületi minőségét is felülmúlta. Egyes paramétereiknél azonban itt is volt fröcskölés.

A **4. ábrán** jól látható a furat felületének minősége, sem fröcskölés, sem pedig visszatapadt

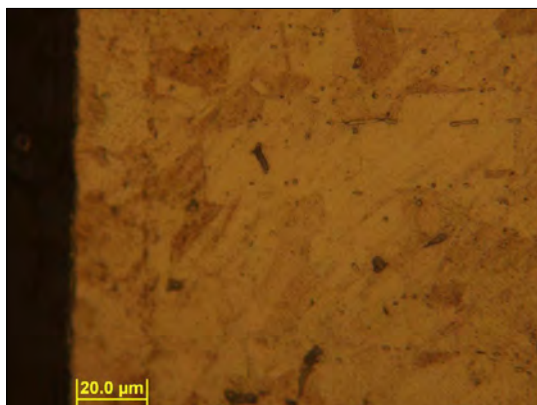


**3. ábra.** A koronglézerral készített mintadarab geometriája



**4. ábra.** Koronglézerral készült furat (φ 13,6 furat)





5. ábra. Koronglézerrel vágott furat olvadákszónája



6. ábra. Fröcskölés a koronglézerrel vágott furat pereménél ( $\phi$  6,2 furat)

salak nem tapasztalható. Az olvadékréteg vastagsága a megadott 60  $\mu\text{m}$  megengedett érték alatt van. Ezt igazolja a furatról készült metallográfiai kép is, amely az 5. ábrán látható.

Szemrevételezés során a furat pereme és felülete is megfelelő, azonban csökkentett teljesítmény mellett megjelent a fröcskölés. A kisebb teljesítményen végzett vágások jelentős utómunkával eltávolítható fröcskölést eredményeztek.

A vágógáz nem mindenhol tudta megfelelően kifújni az olvadékat, ami fröcskölést okozott. Ennek eredménye a 6. ábrán látszik. A fókusz távolság változtatásával a furat minőségének drasztikus romlása látható a 7. ábrán. Látszik, hogy a felületi érdessége megnőtt, és fröcskölésből származó olvadék jelent meg a furat és a darab felületén egyaránt.

Összességében kijelenthető, hogy a szemrevételezés és a fénymikroszkópos vizsgálat alapján a koronglézerrel készült furatok többségénél a felületi érdesség kisebb, mint a  $\text{CO}_2$ -lézerrel készült furatoknak, azonban mivel ezek az alkatrészek

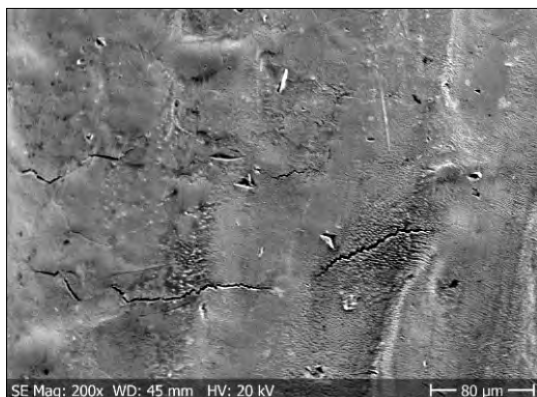


7. ábra. Koronglézerrel készült furat – a fókusz távolság eltért a középvonaltól ( $\phi$  13,6 furat)

ciklikus hőterhelésnek lesznek kitéve, a felületen nem megengedett mikrorepedések. Ezért a fénymikroszkópos vizsgálatok eredménye nem bizonyult elegendőnek, hiszen ezekkel a repedések nem kimutathatók, ezért a továbbiakban a jóval nagyobb felbontóképességű pásztázó elektronmikroszkóppal készítettem képeket. A furatokat a lehető legkisebb hőbevitel érdekében vízgárral vágtuk felbe. A vágott furatok felületét már mikroszkóp alatt tudtuk vizsgálni, amely jóval nagyobb nagyítású és felbontású képek készítésére alkalmas. A nagy felbontás segítségével ezeken a képeken olyan kiválások, repedések és anyaghibák is kimutathatók, amelyek fénymikroszkóp alatt nem láthatók.

Ezeken a képeken már jól látszik, hogy a koronglézerrel készült, kívülről jó minőségű furatok apró, de veszélyes hibát hordoznak. A furat felületén keresztirányban mikrorepedések vannak. Az ilyen hibák ciklikus hőterhelés hatására képesek továbbterjedni, és ez akár az alkatrész tönkremeneteléhez is vezethet. A  $\text{CO}_2$ -lézer által készített furatokban is találtunk repedést, azonban ezek mennyisége annyira csekély, hogy a megrendelő által előírt tűrésmezőn belül van. A koronglézer esetében viszont a repedések mennyisége a  $\text{CO}_2$ -lézer esetében elfogadott érték felett van, így ezek a furatok nem felelnek meg. A 8. ábrán jól kivehető, hogy viszonylag sok repedés látható a lézervágáskor megolvadt furat felületén, melyek mind keresztirányban helyezkednek el, sokszor a lemezvastagság közepénél.

A repedések hosszúságának és szélességének meghatározására nagyobb nagyításban is készítettem képeket. A 9. ábrán jól látszik, hogy a repedések hossza 30–80  $\mu\text{m}$  között mozog, szélességük pedig 2–4  $\mu\text{m}$ .



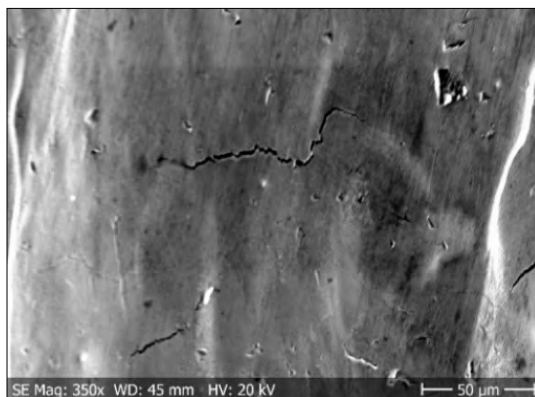
**8. ábra.** Repedés a furat felületén koronglézerrel való vágás után (SEM-felvétel)

Az elektronmikroszkóppal vizsgált furatokról készült képeken végig hasonló tendencia mutatkozik meg, a repedések hossza 30–100 µm között mozog, szélességük pedig 2–4 µm. A repedések mélysége azonban a mikroszkópos képek alapján nem állapítható meg. A vizsgálatok egyelőre csak a CO<sub>2</sub>-lézer által végzett vágásokra és a koronglézer egyik változójára terjedtek ki. A további folyamatváltozók részletes roncsolásos anyagvizsgálataira is sor fog kerülni.

A meglévő adatok alapján és a szakirodalom segítségével következtetni tudok a repedések okára.

A szakirodalmi adatok a lézerrel vágott felületeken megjelenő repedések egyik lehetséges okaként alapanyag hengerlése során kialakult rétegződéseket nevezik meg, ami magyarázná a furatokban a vágásra merőleges, keresztirányú repedéseket. Azonban nagyítás mellett láthatóvá vált, hogy a repedések alapvetően töredezettek (8–9. ábra), és a koronglézeres vágásnál nincsenek bizonyos zónához kötve, hanem a furat teljes felületén szétszórtan megjelennek, ezért ennek az opciónak kicsi a valószínűsége.

A második lehetőség az úgynevezett likvációs repedés. E témával Lippold [8, 9] foglalkozik behatóan. Az erősen ötvözött anyagokban hegesztés vagy vágás során a részben megolvadt zónában kialakulhatnak az alapanyag-összetételtől függően különböző karbidok. Ezeknek a karbidoknak, mint amilyen a nióbbium-karbid, titán-karbid vagy króm-karbid, nagyobb az olvadáspontja, mint az őket körülvevő anyag, ezért a részben megolvadt zónában a karbidok nem olvadnak meg, és ezek az ömledék szilárdulásakor repedéseket okoznak, viszont az általunk vizsgált anyagban sem Nb, sem Ti nincs. Króm-karbid-kiválás megjelenhet, mint az 5. ábra jobb szélső repedése, de jellemzően a repedéseknél karbid jelleget nem sikerült ki-



**9. ábra.** Repedés a furat felületén koronglézerrel való vágás után (SEM-felvétel)

mutatni. Ausztenites acélokban, ha a varrat ferrittartalma eléri az 5–10%-ot, általában nem jelentkeznek repedések, ha nem túl nagy a hőbevitel és nem konkáv a felület [10], de a mi mintáinknál sajnos nincs hozaganyag, konkáv a felület, nagy a hőbevitel és a koronglézeres vágásnál nitrogént használunk, ami ausztenitképző.

## 5. Következtetések

Az elvégzett vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy a koronglézerrel készült furatok szemrevételezéssel láthatóan jobb minőségűnek bizonyultak, az olvadákszóna vastagsága 40 µm alatt volt az összes mintadarabban, repedést azonban nem találtunk a metallográfiai vizsgálatok során. A CO<sub>2</sub>-lézerrel készült darab felülete és pereme kevésbé volt jó minőségű, azonban a furat felületén mikrorepedések nem találhatók. Annak ellenére, hogy szemrevételezésnél rosszabb minőségűnek tűnik, a furat felületén sokkal kevesebb a repedés. A fröcskölés és a visszatapadó salak minimális utómunkálással eltüntethető.

Koronglézer használatkor, paraméter-változtatások segítségével csökkenthető a hőbevitel, amivel jobb felületi minőséget tudunk elérni, ám a mikrorepedések mennyiségének vizsgálata a változtatott paraméterek hatására további vizsgálatokat igényel. Jelen vizsgálatok alapján úgy találtuk, hogy ipari alkalmazásra a CO<sub>2</sub>-lézer által készített alkatrészek használhatók a jelen paraméterekkel.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton kívánnak köszönetet mondani a munkánkhoz nyújtott anyagi támogatásért az EFOP-3.6.1-16-2016-00010 számú projekt keretében a magyar államnak és az Európai Uniónak.

**Szakirodalmi hivatkozások**

- [1] Seon S., Shin J. S., Oh S. J., Park H., Chung C.-M., Kim T.-S., Lee L., Lee J.: *Improvement of cutting performance for thick stainless steel plates by step-like cutting speed increase in high-power fiber laser cutting*. Optics and Laser Technology, 103. (2018) 312–317.  
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.054>
- [2] Berkmanns J., Faerber M.: *Facts about laser cutting*. Linde AG Linde Gas Division, Höllriegelskreuth [www.laserdeal.com/techInfoFiles/\\_FactsAbout\\_LasertBasics.pdf](http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/_FactsAbout_LasertBasics.pdf)
- [3] Parthiban A., Chandrasekaran M., Muthuraman V., Sathish S.: *Optimization of CO<sub>2</sub> Laser Cutting of Stainless Steel Sheet for Curved Profile*, ICAFM, 2017. 14531–14538.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.03.042>
- [4] Kotadiya D. J., Pandya D. H.: *Parametric analysis of laser machining with response surface method on SS-304*. ICIAME, 2016. 376–382.  
<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.040>
- [5] Kotadiya D. J., Kapopara J. M., Patel A. R., Dalwadi C. G., Pandya D. H.: *Parametric analysis of process parameter for Laser cutting process on SS-304*. ICMPC, 2017. 5384–5390.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.124>
- [6] Buza G.: *Lézersugaras technológiák I*. Edutus Főiskola, Budapest, 2012. 4–65.
- [7] Leibinger-Kammüller N.: *The Laser as a tool*. TRUMPF GmbH + Co., Ditzingen, 2007.
- [8] Lippold J. C.: *Welding Metallurgy and Weldability*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2015. 119–130.
- [9] Lippold J. C., Kotecki D. J.: *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. Wiley, Hoboken, 2014.
- [10] Shields J., Kovach C. (szerk.): *Practical Guidelines for the Fabrication of High Performance Austenitic Stainless Steels*. International Molybdenum Association (IMOA), London és International Chromium Development Association (ICDA), Paris, 2010.  
[https://www.imoa.info/download\\_files/stainless-steel/Austenitics.pdf](https://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Austenitics.pdf)

## Szénszállal erősített műanyag marásának vizsgálata

### Investigation of Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastic

Horváth Richárd,<sup>1</sup> Stadler Róbert Gábor, Andrásfalvy Kristóf

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

<sup>1</sup> horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu

#### Abstract

The utilization of fiber reinforced plastics has increased significantly in the past decades. Consequently, the demand for finishing and machining of such materials has also escalated. During machining the fiber reinforced materials exhibit machining problems dissimilar to the problems of metals. These are fiber pull-out, fiber breakage in the cutting zone, matrix smearing and delamination. The purpose of this experiment is to investigate the characteristics of the resultant force (Fe) during milling of carbon fiber reinforced plastic as a function of input machining parameters. For the force measurements CFR with perpendicular (0°–90°) fiber orientation was machined. The experimental design involved the central composite design method. To analyze and evaluate the measurements the response surface methodology was applied.

**Keywords:** milling, cutting force, central composite design, RSM method.

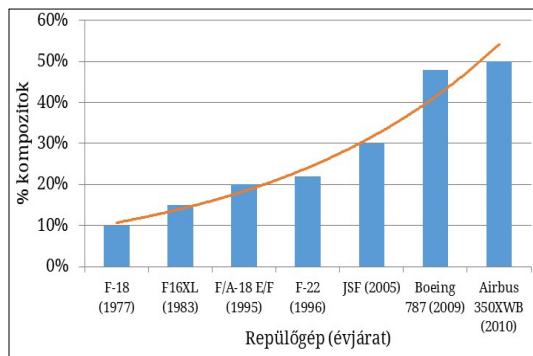
#### Összefoglalás

A szálerősítésű műanyagok használata jelentősen megnőtt az elmúlt évtizedekben. Ezzel együtt megnőtt az igény az ilyen anyagok befejező megmunkálására, azok forgácsolására. A szálerősítésű anyagok forgácsolásakor viszont számos, a fémek forgácsolási hibáitól eltérő hiba jelentkezik, ilyen a szálkiszakadás, a szálak törése a forgácsolási zónában, a mátrixanyag elkenődése és a delamináció. Jelen vizsgálat célja, hogy a szénszállal erősített műanyag marása során feltárjuk az eredő forgácsolóerő (Fe) jellemzőit a bemenő forgácsolási paraméterek függvényében. A mérések során egymásra merőleges (0–90°) szálelrendezésű anyagot martunk. A kísérlet során a középpontos kompozíciós kísérlet tervet használtuk. A kiértékelés során pedig a válaszfüggvények módszerét alkalmaztuk.

**Kulcsszavak:** CFR-marás, forgácsolóerő, középpontos kompozíciós kísérletterv, RSM-módszer.

#### 1. Bevezetés

A műszaki célú szerkezeti anyagok új generációs családjába sorolhatóak a szálerősítésű kompozitok. Kedvező mechanikai tulajdonságainak köszönhetően napjainkban egyre jobban növekszik a szálerősítésű (pl. szén vagy üveg) anyagok felhasználása a különböző iparágakban. Az egyik legnagyobb felhasználó a repülőgépipar. Az **1. ábra** a szénszállal erősített kompozitok aeroszerkezetekben történő alkalmazásának folyamatosan növekvő tendenciáját mutatja [1]. A repülőgépgyártók a következő generációjú repülőgépeket már úgy tervezik, hogy a kompozitok aránya meg



**1. ábra.** Kompozitok aránya az egyes konstrukciók aeroszerkezetében



fogja haladni az 50%-ot. Ez többek között tovább csökkentheti a tüzelőanyag-felhasználást, illetve a CO<sub>2</sub>-kibocsátást is 20–25%-kal [2].

A szénszállal erősített műanyagok végső megmunkálása történhet forgácsolással. A technológiai előtervezés során fontos megfelelő pontossággal ismerni, hogy a bemenő forgácsolási paraméterek függvényében a forgácsolás során mekkora erők lépnek fel, és hogy ezek az erők milyen hatással vannak a megmunkálendő munkadarabra, valamint a szerszámra. Ezért napjainkban számos kutatás foglalkozik a szénszállal erősített műanyagok forgácsolással való megmunkálásával.

A szénszállal erősített polimerek és az üvegszállal erősített polimerek megmunkálhatóságával foglalkoznak átfogóan Meltem és Hasan [3] 2018-as publikációjukban. Áttekintették az utóbbi évek kortárs publikációit a kompozitok hagyományos megmunkálásával kapcsolatban (esztergálás, marás, fúrás stb.). Az összefoglaló irodalmi áttekintés alapján az alábbi általános következtetések vonhatóak le:

- az előtolási sebesség növelése nagyobb nyomóerőt eredményez;
- a legkisebb delamináció kis forgácsolási sebességen és kis előtolási sebességen érhető el;
- a legkisebb átlagos felületi érdesség eléréséhez nagy forgácsolási sebesség és kis előtolási sebesség szükséges.

Mathivanan és társai [4] üvegszállal és szénszállal (GFRP és CFRP) erősített műanyagok forgácsolhatóságát vizsgálták zárt horony marása esetén. A munkadarabban a szálak egymásra merőlegesen voltak elhelyezve. A forgácsolási kísérletben (kilenc mérési pont) Ø 10 mm-es K10-es keményfém marót használtak, a forgácsolási paramétereket (forgácsolási sebesség és fogankénti előtolás) három szinten változtatták. Alapvetően az eredő erőt vizsgálták és megállapították, hogy különösen az előtolás növeli jobban az eredő erőt. Kis előtolást és nagy forgácsolási sebességet ajánlanak az ilyen típusú anyagok forgácsolásához.

Haijin és társai [5] szénszállal erősített műanyagot martak. A marási kísérletek során mérték a fellépő erőt, valamint a marás során keletkező hőmérsékletet. Középpontos kompozíciós kísérlettervet alkalmaztak, az elemzés során pedig a válaszfüggvények (RSM) módszerét. A bemenő paraméterek a forgácsolási sebesség, az előtolási sebesség és a fogásmélység voltak. Következtetésként azt vonták le, hogy az eredő erőt a legjobban az előtolási sebesség befolyásolja, míg a hőmérsékletre a forgácsolási sebesség van a legnagyobb hatással.

Çolak és Sunar [6] 32 laminált rétegből álló, szénszállal erősített kompozit marási vizsgálatát végezték el. A marások során  $\phi$  10 mm PCD-szerszámot használtak, és két szinten változtatták a forgácsolósebességet (50 m/min és 100 m/min), valamint öt szinten a fogankénti előtolást (0,050; 0,075; 0,100; 0,125; 0,150 mm). A vizsgálatok során mérték mind a három erőkomponenst, valamint a felületi érdességet. A méréseik alapján arra az eredményre jutottak, hogy kisebb forgácsolóerőt lehet elérni nagyobb forgácsolósebességen és kisebb előtoló-sebességen, míg a felületi érdesség (Ra) romlik az előtolási sebesség növelésével és a forgácsolási sebesség csökkentésével.

Yanli és társai [7] a szálorientáció, a forgácsolási sebesség, illetve az előtolási sebesség függvényében vizsgálta a marás során fellépő erőt, valamint a delaminációt. A marások során 0, 45, 90 és 135 fokként martak egy 43 rétegű egyszálirányú szénszállal (TC35-12K / 150) erősített műanyagot. A laminált kompozit vastagsága 6 mm, és a szálak térfogataránya megközelítőleg 60%. A marások során három szinten változtatták a forgácsolási sebességet és az előtolási sebességet. A marásokat  $\phi$  8 mm-es maróval végezték. Vizsgálataikban részletesen megállapították, hogy a forgácsoló erő komponensek hogyan függenek a száliránytól. Továbbá részletesen vizsgálták a delamináció jelenségét is.

Erol Kiliçkap és társai [8] 16 rétegű szénszállal erősített kompozitot martak, ahol a szálak egymásra merőlegesen helyezkedtek el. A marási kísérleteket két különböző fogszámú keményfém marószerszám (3 fogú és 4 fogú) alkalmazása mellett hajtották végre. A forgácsolási folyamat paraméterek közül három szinten határozták meg a forgácsolási sebességet (31,4; 62,8; 94,2 m/min) és az előtolási sebességet (100, 150, 200 mm/min), míg a fogásmélységet (1,5 mm) állandó értéken tartották. A marások során mérték az erőkomponenseket és a mart felületek érdességét, valamint a felületen keletkezett delaminációs jelenségeket is vizsgálták. Azt a következtetést vonták le, hogy az előtolás növelésével az eredő erő is megnövekszik, valamint a 4 fogazattal rendelkező szer számmal jobb eredményeket kaptak.

Geier N. és Szalay T. [9] szénszállal erősített kompozitot fúrtak és (spirál) martak. A fúrásokat egy SECO SD205A-11.138-53-12R1-C1 speciális gyémántbevonatú fúróval, míg a marásokat egy TIVOLY 8236651 1000 keményfém-végmaróval hajtották végre. A forgácsolási kísérletek során mérték a fellépő erőkomponenseket, a mart felületeket és a furatok érdességi paramétereit.

Ezen felül a megmunkált felületeken vizsgálták a fellépő delaminációt. A mérések során kísérletet alkalmaztak, így 13 fúrás és 20 marási kísérletet végeztek. A mért eredményeket ANOVA-módszerrel elemezték. A forgácsolási folyamatváltozókat 5 szinten változtatták mind a két forgácsolási eljárásnál. Fúrásnál a forgácsolási sebességet (50, 65, 100, 135, 150 m/min) és a fogankénti előtolást (0,035; 0,043; 0,064; 0,078; 0,093 mm). Marásnál a forgácsolási sebességet (50, 70, 100, 130, 150 m/min), az előtolást (0,020; 0,028; 0,040; 0,051; 0,060 mm és a marás menet- emelkedését (0,100; 0,068; 1,550; 2,410; 3,000 mm). Munkájukban optimális folyamatváltozókat állapítottak meg, valamint arra a következtetésre jutottak, hogy a keményfém maróval végzett megmunkálás jobb minőségű furatokat eredményezett, mint a gyémántbevonatú fúróval végzett.

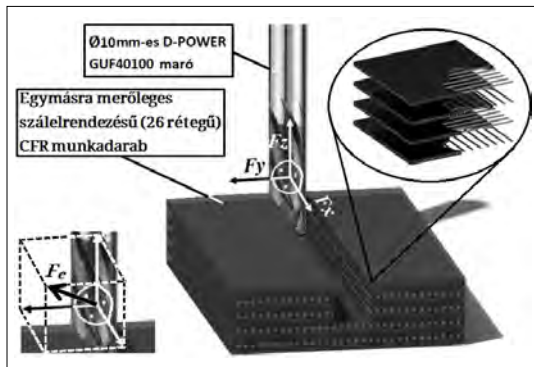
Ebben a cikkben egy szénszállal erősített műanyag marási vizsgálatait végezzük el, mérve a fellépő erőkomponenseket, valamint elemezzük azok eredőjét. Megvizsgáljuk a bemenő forgácsolási folyamatváltozók hatását az eredő erőre. Prediktív modellt építünk, mellyel technológiai előtervezésben megfelelő pontossággal becsülhető a fellépő eredő erő nagysága, hiszen a legtöbb elforduló hiba és a gyártott darab minőségi jellemzői (pl. delamináció, méretpontatlanság, száltörések a forgácsolási zónában, szélkiszakadások, felületi érdesség értékei) nagymértékben függenek a fellépő forgácsolási erőtől.

## 2. Anyag és módszer

### 2.1. A kísérletben használt alapanyag és szerszám

A marások során 26 rétegű (10 mm vastag), vákuuminfúziós eljárással készült, szénszállal erősített kompozitot martunk. A vázanyag típusa Zoltek Panex 35 szénszál, melynek főbb jellemzői: négyzetméterre vetített tömege 400 g/m<sup>2</sup>; szakítószilárdsága 4137 MPa; rugalmassági modulusa 242 GPa; valamint az elemi szálak átmérője 7,2 μm. A felhasznált epoxi gyanta típusa Araldite LY 1564, valamint a térhálósító típusa Aradur 3487. A felhasznált arányuk: 100 g gyanta/34 g térhálósító.

A szálakat tartalmazó rétegek egymásra merőlegesen helyezkedtek el (2. ábra). A próbatestet φ10mm-es szálerősítésű kompozitok megmunkálására specializált D-POWER GUF40100 kompressziós szármaróval végeztük. Ennek a szerszámnak nagy előnye, hogy csökkenti a laminált rétegek egymástól való eltávolodását.



2. ábra. Forgácsolási kísérlet elrendezése, erőkomponensek iránya

### 2.2. A kísérletben használt mérőeszközök és mért paraméterek

A marási kísérleteket Mazak Nexus 410A-II megmunkáló központon végeztük. A marási kísérletek során, piezoelektromos elven működő KISTLER 9257b típusú erőmérő rendszert alkalmaztunk. Ennek segítségével mértük az  $F_x$ ,  $F_y$  és  $F_z$  irányú erőkomponenseket. Az erőmérő mérési tartománya  $F_x = F_y = -5-5$  kN, valamint  $F_z = -5-10$  kN. A mért erőadatokat Kistler DynoWare szoftverrel elemeztük ki. A szerszámra és a munkadarabra az erőkomponensek eredője hat (1. ábra), ezért a mért három erőkomponens eredőjét ( $F_e$ ) vizsgáltuk:

$$F_e = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

### 2.3. Alkalmazott kísérletterv bemutatása

A marási kísérletek középpontos kompozíciós kísérletterv alapján készültek. A bemenő változókat (forgácsolási sebesség, fogankénti előtolás, fogásmélység) három szinten változtattuk. A kiértékeléshez a válaszfüggvények módszerét használtuk. A szintek egymástól ekvidisztáns távolságra vannak (1. táblázat, 3. ábra). A mért kimenő változó az eredő erő ( $F_e$ ). Célunk az volt, hogy megtaláljuk a kapcsolatot a független bemenő változók  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – és a függő kimenő változó  $Y$  között:

$$Y = \Omega(x_1, x_2, x_3) \quad (2)$$

ahol  $\Omega$  a válasz függvény, mely az alábbi általános alakban írható fel:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + \varepsilon \quad (3)$$

ahol  $b_{ij}$ ,  $b_i$  és  $b_{ij}$  a számított koefficienssek;  $x_1$ ,  $x_2$  és  $x_3$  a bemenő változók;  $\varepsilon$  a hiba. A (3) modell figyelembe veszi a bemenő folyamatváltozókat, azok másodfokú tagjait, valamint ha van szignifikáns hatásuk, akkor a bemenő folyamatváltozók kereszt hatásait.

**2.4. Az alkalmazott kísérletterv mérési pontjai**

A szakirodalom és a szerszámkatalógus ajánlái alapján határoztuk meg a beállítandó forgácsolási paramétereket és azok szintjeit (1. táblázat).

A 1. táblázat alapján a mérési pontokat a forgácsolási paraméter-tartományon a 3. ábra szemlélteti. A kísérletterv alapján a kocka sarokpontjait és tengelypontjait egyszer, míg a tervközéppontot alkotó folyamatváltozókkal hatszor martuk a kísérleti anyagot.

A kísérleti pontok elhelyezkedéséből adódó kísérleti pontokat és azok változóit ismerteti a 2. táblázat.

**3. Eredmények**

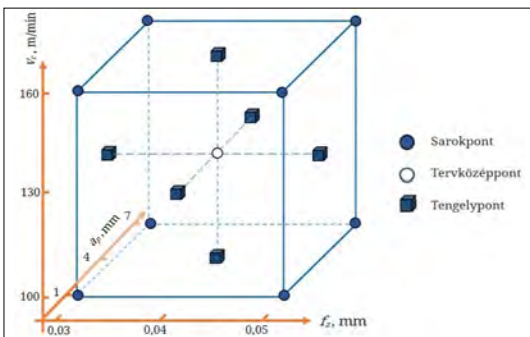
**3.1. A forgácsolási folyamatváltozók hatása az eredő erőre**

A 4. ábrán látható az eredményekből kapott főhatásábra.

A főhatás-ábrából látszik, hogy a fogankénti előtolás és a fogásmélység növelésével az eredő erő nő.

**3.2. Prediktív modell az eredő forgácsolási erő becslésére**

A 3. táblázatban látható, hogy melyek azok a forgácsolási változók, amik a marási kísérletek során az eredő erő értékére szignifikáns hatással voltak (a bemenő folyamatváltozók lineáris tagjai szignifikáns hatásuktól függetlenül a modellben maradnak).



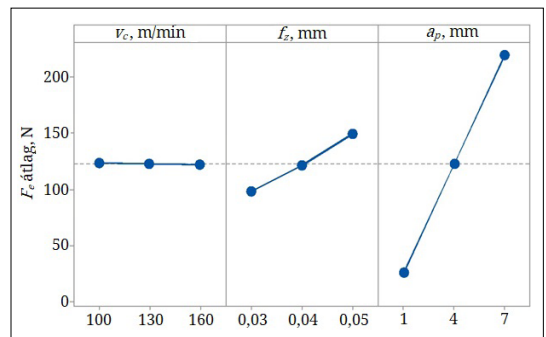
3. ábra. A kísérleti pontok elhelyezkedése a forgácsolási paraméterterben

1. táblázat. A bemenő változók értékei

Folyamatváltozók		Szintek		
		-1	0	1
$x_1$	forgácsolási sebesség – $v_c$ , m/min	100	130	160
$x_2$	előtolás – $f_z$ , mm	0,03	0,04	0,05
$x_3$	fogásmélység – $a_p$ , mm	1	4	7

2. táblázat. A 20 mérési pont mért és számolt eredő erő eredményei

Kísérleti pontok	$v_c$ m/min	$f_z$ mm	$a_p$ mm	$F_e$ N (mért)	$F_e$ N (számolt)
1.	100	0,03	1	26,57	22,83
2.	160	0,03	1	18,95	21,70
3.	130	0,04	1	21,03	26,07
4.	100	0,05	1	33,95	30,45
5.	160	0,05	1	31,17	29,32
6.	130	0,03	4	99,32	97,04
7.	100	0,04	4	117,31	123,17
8.	160	0,04	4	114,24	122,04
9.	130	0,04	4	133,70	122,61
10.	130	0,04	4	131,05	122,61
11.	130	0,04	4	127,07	122,61
12.	130	0,04	4	122,48	122,61
13.	130	0,04	4	118,16	122,61
14.	130	0,04	4	124,19	122,61
15.	130	0,05	4	142,72	148,18
16.	100	0,03	7	173,24	172,38
17.	160	0,03	7	174,36	171,25
18.	130	0,04	7	208,12	219,14
19.	100	0,05	7	267,26	267,03
20.	160	0,05	7	273,99	265,90



4. ábra. A forgácsolási folyamatváltozók hatása az eredő erőre



**3. táblázat.** Szignifikanciavizsgálat eredménye (✓ – a folyamatváltozónak van hatása az eredő erőre, X – a folyamatváltozónak nincs hatása az eredő erőre)

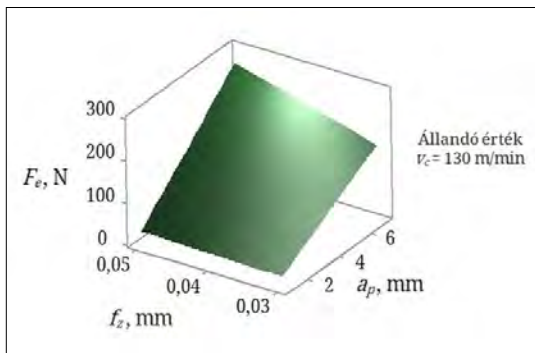
Forgácsolási faktorok	
$v_c$	✓
$f_z$	✓
$a_p$	✓
$v_c^2$	X
$f_z^2$	X
$a_p^2$	X
$v_c \cdot f_z$	X
$v_c \cdot a_p$	X
$f_z \cdot a_p$	✓

A szignifikanciavizsgálat elvégzése után az eredő forgácsolóerőre ható tényezőkből a következő prediktív modellt állítottuk fel:

$$F_e = 10,1 - 0,0188 \cdot v_c - 344 \cdot f_z + 3,17 \cdot a_p + 725,2 \cdot f_z \cdot a_p \quad (4)$$

A prediktív modell (4) grafikus ábrázolását mutatja a forgácsolási folyamatváltozók függvényében az **5. ábra**, amelyről jól látható, hogy a minimális forgácsolási erőt a legkisebb előtolásnál és a legkisebb fogásmélységnél kapjuk.

A prediktív modell akkor tekinthető a technológiai előtervezésben megfelelőnek, ha a reziduumok (mért és a számított értékek közötti különbség – reziduum) várható értékei nulla közeliek, és a reziduumértékek szórása minél kisebb. A **6. ábrán** látható a mért és számított eredmények közötti különbségek ábrázolása normalitáshálón. Jól látható, hogy az eredő erő becslése-



**5. ábra.** A prediktív modell (4) grafikai ábrázolása

kor a hibák várható értéke közel zérus, a hibák eloszlása jól közelíti a normálist, azok szórása  $\pm 5,7$  N.

#### 4. Következtetések

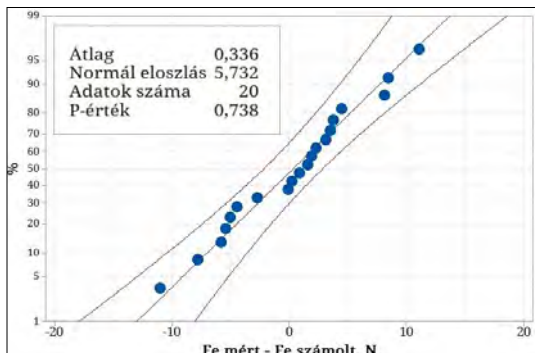
Jelen kutatásban szénszálerősítésű kompozitanyag marásának vizsgálatát végeztük el közép-pontos kompozíciós kísérletterv segítségével. A forgácsolási folyamatváltozókat (forgácsolási sebesség, fogankénti előtolás, fogásmélység) három szinten változtattuk és mértük a forgácsolóerő-komponenseket, majd vizsgáltuk az eredő forgácsolási erőt. Főhatásábrával elemeztük a forgácsolási folyamatváltozók hatását a vizsgált jellemzőkre, prediktív modellt készítettünk az eredő forgácsolóerő becslésére, mely a technológiai előtervezést segítheti. Vizsgálatainkból az alábbi következtetések vonhatók le:

- az eredő forgácsolóerőre a forgácsolási sebesség van a legkisebb (elhanyagolható) hatással;
- az előtolás és a fogásmélység növelésével az eredő forgácsolási erő növekszik;
- a legnagyobb hatást a forgácsoláskor keletkező eredő erőre a fogásmélység gyakorolja;
- prediktív modellt hoztunk létre az eredő erő becslésére a forgácsolási változók vizsgált tartományán, mellyel  $\pm 5,7$  N szórással lehet az eredő erő értékét meghatározni.

#### Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket szeretnék kifejezni a KANDSI Kft.-nek (AKOBEZ), hogy biztosította az egyedileg gyártott munkadarabokat, illetve a GranTOOL Kft.-nek, hogy biztosította a vizsgálatok elvégzéséhez szükséges szerszámot.

Jelen cikk az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-2018-1-I kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.



**6. ábra.** A mért és számított eredmények reziduumainak ábrázolása normalitáshálón

## Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Hashish M., Kent W. A.: *Trimming of CFRP aircraft components*. In: WJTA-IMCA conference and Expo, 2013. September
- [2] Timmis A. J., Hodzic A., Koh L., Bonner M., Soutis C., Schäfer A. W., Dray L.: *Environmental impact assessment of aviation emission reduction through the implementation of composite materials*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 20/2. (2015) 233–243. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0824-0>
- [3] Karataş M. A., Gökkaya H.: *A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials*. Defence Technology, 14/4. (2018) 318–326. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.02.001>
- [4] Mathivanan N. R., Mahesh B. S., Shetty, H. A.: *An experimental investigation on the process parameters influencing machining forces during milling of carbon and glass fiber laminates*. Measurement, 91. (2016) 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.077>
- [5] Wang H., Sun J., Li J., Lu L., Li N.: *Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 82. (2016) 9–12. 1517–1525. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7479-2>
- [6] Çolak O., Sunar T.: *Cutting forces and 3D surface analysis of CFRP milling with PCD cutting tools*. Procedia CIRP, 45. (2016) 75–78. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.091>
- [7] He Y., Qing H., Zhang S., Wang D., & Zhu S.: *The cutting force and defect analysis in milling of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composite*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 93/5–8. (2017) 1829–1842. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0613-6>
- [8] Kiliçkap E., Yardımeden A., Çelik Y. H.: *Investigation of experimental study of end milling of CFRP composite*. Science and Engineering of Composite Materials, 22/1. (2015) 89–95. <https://doi.org/10.1515/secm-2013-0143>
- [9] Geier N., Szalay T.: *Optimisation of process parameters for the orbital and conventional drilling of uni-directional carbon fibre-reinforced polymers (UD-CFRP)*. Measurement, 110. (2017) 319–334. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.007>

## Kompozitanyag fejlesztése dinamikus igénybevételre

### Development of a Composite Material for Impact Load

Kovács Tünde Anna,<sup>1</sup> Nyikes Zoltán,<sup>2</sup> Figuli Lucia<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki kar, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék, Budapest, Magyarország, [kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu](mailto:kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu)

<sup>2</sup> Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola, Budapest, Magyarország, [nyikes.zoltan@phd.uni-obuda.hu](mailto:nyikes.zoltan@phd.uni-obuda.hu)

<sup>3</sup> Zsolnai Egyetem, Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Műszaki és Informatikai Tudományok Tanszék, Zsolna, Szlovákia, [lucia.figuli@fbi.uniza.sk](mailto:lucia.figuli@fbi.uniza.sk)

---

#### Abstract

The goal of this work was to invent a high energy absorbing composite material. This composite needs to be able to attach on the building's surfaces and increase blast-resistance. In this innovation, the test samples were reinforced with aramidfiber, glass fiber and carbon fiber and tested by Charpy pendulum impact testing machine. During the tests, the aramid and glass fiber reinforced composites showed good resistance and high energy absorption against impact load.

**Keywords:** *composite, impact load, blast-resistant material.*

#### Összefoglalás

Ebben a dolgozatban nagy energiaeinyelő képességű kompozitanyag kifejlesztése volt a cél, mely a kompozitépületek falazatára szerelve növeli a robbanással szembeni ellenállást. A fejlesztés során aramidszál, üvegszál és szénszál erősítésű próbatestek készültek, melyek vizsgálata Charpy-ütőművel történt. A vizsgálatok során az üveg- és az aramidszálakkal erősített, kerámiaalapú kompozitok mutattak jó ellenálló- és energiaeinyelési képességet ütéssel szemben.

**Kulcsszavak:** *kompozit, dinamikus igénybevétel, robbanásálló anyag.*

---

#### 1. Bevezetés

Minden évszázadban találunk fegyvereket és pajzsokat azokban az országokban, amelyeknek szükségük volt ezekre. Az anyagtudomány és technológia fejlődésével a fegyverek és a védelem is fejlődött. Korunkban nemcsak a háború, de a terrorizmus is fenyeget. A terroristamerényletek váratlanul és számos módon következhetnek be. Az alkalmazott módszerek és robbanóanyagok katasztrófát okozhatnak. A károk enyhítésére (emberélet, épületek, járművek stb.) szükséges a meglévő épületek bevonatokkal történő megerősítése vagy robbanásálló anyagok alkalmazása az építkezéseknél [1–4].

A dinamikus igénybevételek hatására az anya-

gok rideg viselkedést mutatnak. Az épületek esetében alkalmazott kerámiatéglák törés közben sok darabra esnek, melyek szétszóródva veszélyt jelentenek. A régi épületek anyagait már nem lehet modern anyagokra cserélni, ezért az utólagos erősítésük megoldást jelenthet [5–9]. Ezzel a módszerrel nem rontanánk a városképet, azonban biztonságosabbá tehetnénk ezeket az épületeket. A falak bevonattal való megerősítésére megfelelő anyagot kell választani. A jelenleg alkalmazott építőipari burkolóanyagok alkalmasak hőszigetelésre, de dinamikus igénybevétel esetén nem nyújtanak védelmet és nem erősítik a falazatot, sőt az alkalmazott hőszigetelő anyagok nagy része tűzveszélyes.

A kompozit tervezésének legfontosabb része az igénybevétel meghatározása és ebből a feszültség meghatározása [10–14]. A terhelés alapján lehet a mátrixot és az erősítő elemeket kiválasztani, illetve megfelelőségüket elemezni. Jelenleg igen nagy számú mátrix- és erősítőanyag közül lehet választani. Ezen anyagokból építhető fel megfelelő társítással a meghatározott igénybevételeknek megfelelő kompozit.

Kompozitok tervezéséhez számos tervező rendszer is alkalmazható, melyeknek széles adatbázisuk van, és ezek segítségével mind az anyagválasztás, mind a tervezés egyszerűbbé válik.

## 2. A kompozit-próbatestek előállítás

A tervezés során három különböző erősítőanyag állt rendelkezésre (szénszál szövet, üvegszál szövet, aramid-szál szövet), melyek tulajdonságai eltérők. A szövetek tulajdonságai a szövés módjától, vagyis a szálak elrendezésétől függenek, azaz irányfüggők. Az alkalmazott erősítőanyagokat az 1–3. ábrák mutatják.

A laminálással készült kompozit-fedőréteg építése során mátrixként epoxigyantát (Araldite LY1564) választottunk. A kompozit tervezése során figyelembe vett anyagok tulajdonságait az 1. táblázat mutatja.

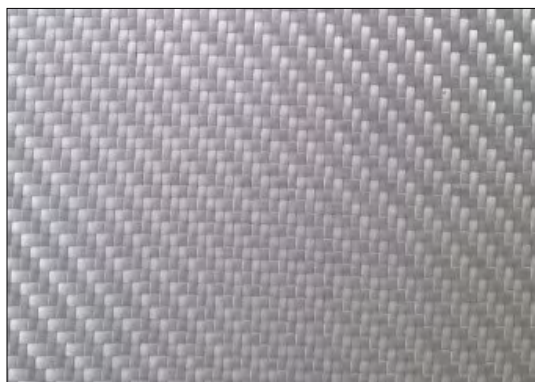
A kompozit-hoz egyirányú szálelrendezésű erősítőszövetet használtunk. A próbatestek bemetszés nélküliek voltak. Az elvégzett Charpy-vizsgálat eredményeit az 1. táblázat mutatja [2].

A szakirodalmi ajánlások [2] alapján a kis ütőszilárdságot mutató gyantával impregnált aramid-szövetből 6 réteget, míg a nagyobb ütőszilárdságú gyantával impregnált szénszál és üvegszál textiltől 4 réteget építettünk a kompozit-fedőrétegbe.

Mivel a cél a jelenleg alkalmazott samottégla megerősítése volt dinamikus igénybevétel mellett szemben, ezért a modellkísérletekhez az alsó és a felső lapján epoxigyantába ágyazott erősítőszálakkal laminált samott-éteglát (réteges hibrid anyagot) készítettünk a 4. ábrán látható rétegszerint.

1. táblázat. Az epoxigyantával impregnált szövetek alkotta kompozitok tulajdonságai [2]

	Üvegszál szövet	Szénszál szövet	Aramid-szál szövet
Ütőszilárdság (kJ/m <sup>2</sup> )	466,2	85,7	76
Sűrűség (kg/m <sup>3</sup> )	1900	1500	1400



1. ábra. Üvegszál szövet



2. ábra. Szénszál szövet



3. ábra. Aramid-szál szövet



4. ábra. A szendvicspanel felépítése



Az alkalmazott erősítőanyagok tulajdonságait és a rétegek jellemzőit a **2. táblázat** foglalja össze.

A szendvicsszerkezetű próbatetek gyártása vákuumfúziós módszerrel történt. Az epoxigyanta szilárdulását követően darabolás következett. A próbatestet az anizotrópiája miatt úgy helyeztük el, hogy a dinamikus hatás a laminált felületet érje (**5. ábra**).

A dinamikus terhelést Charpy-vizsgálattal modelleztük bemetszés nélküli próbatetekeken (**6–8. ábrák**).

**2. táblázat.** A kompozithoz alkalmazott erősítőanyagok és rétegjellemzők

	Üvegszál	Szénszál	Aramidszál
Szövetjellemző (g/m <sup>2</sup> )	390	480	220
Szövés	2/2 sávolyiszövés	2/2 sávolyiszövés	1/1 zsákszövés
Rétegszám	4	4	6
Rétegrend	(0 <sub>sz</sub> ) <sub>4</sub>	(45 <sub>sz</sub> ) <sub>4</sub>	(0 <sub>sz</sub> ) <sub>6</sub>



**5. ábra.** A próbatest elhelyezése a vizsgálat során



**6. ábra.** Az üvegszál szövettel és epoxigyantával laminált próbatest képe

### 3. Kísérletek

A próbatesteket Charpy-féle ingás ütőmű be rendezésen vizsgáltuk MSZ EN ISO 179-1:2010 szabvány alapján [4]. Az első kísérlet során 1 kg tömegű kalapácsot alkalmaztunk a vizsgálathoz a Charpy-vizsgálathoz 10×10×55 mm méretű há-sábokra.

Az üvegszál szövetes laminálással erősített darabok nem törtek ketté, a kalapács visszapattant, a laminált felületen az ütés nyoma látható (**9. ábra**).

Az aramidszál szövetes kompozittal laminált darabok esetén pedig a samotrétég elrepedt, és egyik oldalán a kompozit laminálórétég levált.

A szénszál szövettel és epoxigyantával laminált próbatetek eltörtek (**10. ábra**), a kompozit rideg.

**3. táblázat.** A kísérletek eredményei

	Üvegszál szövetes	Szénszál szövetes	Aramidszál szövetes
Ütőmunka (J)	7,3	5	6,9
Ütőszilárdság (kJ/m <sup>2</sup> )	73	50	69



**7. ábra.** A szénszál szövettel és epoxigyantával laminált próbatest



**8. ábra.** Az aramidszál szövettel és epoxigyantával laminált próbatest

A kísérleteket megismételtük 30 kg tömegű kalapáccsal, ami már nem adott mérhető értéket, mivel mind a három vizsgált típus eltört, ezért az értékelést a darabok szemrevételezésével végeztük.

#### 4. Következtetések

Az üvegszál szövettel és a szénszál szövettel laminált próbatestek a 30 kg-os kalapáccsal végzett kísérletben ridegen törtek és nem mutattak ellenállást (12–13. ábra). Az aramidiszál szövettel laminált darabok esetén azonban a darab samott belseje megrepedt, de az aramidiszövetes erősítés nem tört el (14. ábra). Az egyik oldalon levált a kerámia felületéről az aramidiszövetes laminált réteg, ez azt mutatja, hogy az adhéziós kötés nem volt megfelelő.

Az aramidiszövettel laminált próbatestek törése az 1 kg-os és a 30 kg-os kalapács esetén is azonos módon történt, a szendvicspanel nem esett szét, míg az üvegszállal erősített darabok 1 kg-os kala-

páccsal végzett ütés esetén meg sem repedtek, a 30 kg-os kalapáccsal végzett ütésnél ridegtörést mutattak.

További tervünk a vizsgálatokat 1 kg és 30 kg közötti kalapáccsal végezni, hogy kimutatható legyen a határterhelés esete, amit még az üvegszövetes erősítés elvisel. Megállapítható, hogy az aramidiszövetes laminált réteg dinamikus igénybevétellel szembeni viselkedése igen jó, az aramid és a samott-tégla közötti adhéziós kapcsolat azonban nem elég erős az alkalmazott epoxigyantával.



12. ábra. Üvegszövettel és epoxigyantával laminált próbatest



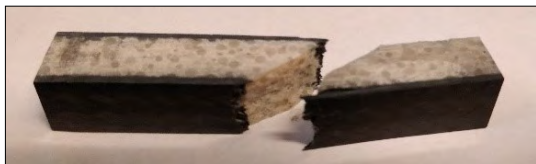
13. ábra. Szénszál szövettel és epoxigyantával laminált próbatest



14. ábra. Aramidiszövettel és epoxigyantával laminált próbatest a törés után



9. ábra. Üvegszövettel laminált próbatest vizsgálat után, a kalapács nyoma jelölve



10. ábra. A szénszál szövetes kompozittal laminált próbatest a vizsgálat után



11. ábra. Az aramidiszál szövettel és epoxival laminált próbatest a törés után

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton szeretnének köszönetet mondani a KANDSI Kft. (AKOBEZ) munkatársainak a próbatetek elkészítése során nyújtott technikai segítségért.

## Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Ashby M. F., Jones D. R. H.: *Engineering Materials 1. An Introduction to Properties, Applications and Design*. Third Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, Cambridge, UK P.K., 2005.
- [2] Szakali M., Szűcs E.: *The defence planning model formation and development / Védelmi tervezési-modellek kialakulása és fejlődése*. Hadmérnök, 12/1. (2017) 24–40. ISSN 1788-1919
- [3] Malick P. K.: *Fiber-reinforced composites*. Third edition. Taylor and Francis, Boca Raton, USA, 2008.
- [4] Ráthy I., Pinke P., Huszák Cs.: *PP mátrixú fröccsöntött kompozitok mechanikai vizsgálatai*. Acta Materialia Transylvanica, 1/2. (2018) 105–109.  
<https://doi.org/10.2478/amt-2018-0039>
- [5] Lange D.: *A review of blast loading and explosions in the context of multifunctional buildings*. Fire technology SP Technical Research Institut of Sweden 2013. ISSN 0284-5172
- [6] Gay E., Berthe L., Boustie M., Arrigoni M., Buzaud E.: *Effects of the shock duration on the response of CFRP composite laminates*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014  
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/45/455303>
- [7] Zvaková Z., Figuli L., Guttenová D.: *Analysis of blast load steel beam*. Juniorstav 2014, VUT Brno, ISBN 978-80-214-4851-3.
- [8] Figuli L., Jangl Š., Papán D.: *Modelling and Testing of Blast Effect On the Structures*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 44. (5), 052051  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/44/5/052051>
- [9] Lu G., Yu T.: *Energy absorption of structures and materials*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England 2000.
- [10] Qiao P., Yang M., Bobaru F.: *Impact Mechanics and High-Energy Absorbing Materials: Review*. Journal of Aerospace Engineering, 21/4. (2008) 235–248.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2008\)21:4\(235\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2008)21:4(235))
- [11] Zhou H., Wang X., Ma G., Liu Z.: *On the effectiveness of blast mitigation with lightweight claddings*. Procedia Engineering, 210. (2017) 148–153.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.060>
- [12] Figuli L., Štaffenová D.: *Practical Aspect of Methods Used for Blast Protection*. Key Engineering Materials, 755. (2017) 139–146.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.755.139>
- [13] Daruka N., Kugyela L.: *Ipari robbanóanyagok megjelenésének lehetőségei az improvizált robbanószerkezetek kialakításának tekintetében*. Robbantástechnika, 35. (2018) 155–174.
- [14] Galusca D. G., Galusca L., Tóth L.: *Analyses of Deformation of Fibre Reinforced Composites*. In: microCAD'98, M Section: International Computer Science Conference. Miskolci Egyetem, 1998.

# Edzett üveg dinamikus és nagy hőmérsékletű, kvázisztatikus vizsgálata

## Dynamic and High Temperature Quasi-static Examination of Tempered Glass

Leveles Borbála,<sup>1</sup> Kemény Alexandra,<sup>2</sup> Katona Bálint<sup>3</sup>

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

<sup>1</sup> [borbala.levelles@edu.bme.hu](mailto:borbala.levelles@edu.bme.hu)

<sup>2</sup> [alexa@eik.bme.hu](mailto:alexa@eik.bme.hu)

<sup>3</sup> [katona@eik.bme.hu](mailto:katona@eik.bme.hu)

### Abstract

In everyday use glass materials cause a lot of damage or injuries when broken, as fracture mechanism and damage runoff can not be predicted precisely. To gain knowledge on this issue, we studied the properties of tempered glass. The glass test samples were exposed to two types of destructive evaluations: normal and high temperature three-point bending and room temperature dynamic experiments with colliding small steel spheres. The evaluation showed that high temperature experiments are in correlation with sharp fracture edges, and dynamic impact creates shell featured circular crack propagation which prevents the spreading of the radial cracks, so the damage is concentrated to a small area.

**Keywords:** *tempered glass, quasi-static bending, fracture surface, dynamic.*

### Összefoglalás

A mindennapokban használt üvegek törése sok esetben okoz károkat és sérüléseket, mivel nehezen megbecsülhető eltérő körülmények között a törési tulajdonsága és a károsodás végbemenetele. Ennek közelebbi megismerése céljából kutatásunk során edzett üveg tulajdonságait vizsgáltuk. Az üveg próbatestek kétféle roncsolásos anyagvizsgálaton estek át: szobahőmérsékleten és nagy hőmérsékleten végzett hárompontos hajlításnak és szobahőmérsékletű dinamikus vizsgálatnak, melyben nagy sebességű acélgolyó becsapódásának tettük ki a mintákat. Megállapítottuk, hogy nagy hőmérsékleten végzett terhelés hatására a próbatesteknek a hőmérséklet növelésével arányosan egyre élesebb a töretfelületük, illetve dinamikus behatás következtében körkörös repedésterjedéssel kagylós jellegű töretkép keletkezik, amely megakadályozza a radiális repedések terjedését, így csak kis területen megy végbe károsodás.

**Kulcsszavak:** *edzett üveg, kvázisztatikus hajlítás, töretfelület, dinamikus behatás.*

### 1. Bevezetés

A hétköznapokban számos területen találkozunk üvegből készült épületelemekkel, tárgyakkal. Elsősorban biztonságtechnikai szempontból érdemes vizsgálni különböző üvegek törési mechanizmusait és a kialakult töretfelületeket különböző balesetek és károk csökkentése érdek-

ben [1, 2]. A legnagyobb mechanikai terhelésnek kitétt üvegtípus az edzett üveg, ezért kutatásunkban ezek törési tulajdonságaival foglalkozunk [3].

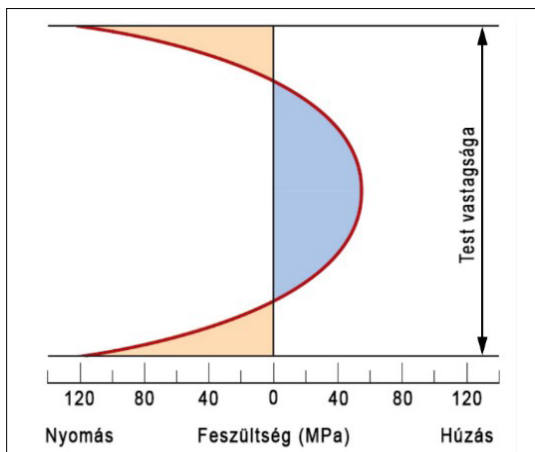
Az üvegnek mint alapanyagként általában nagy a nyomószilárdsága, azonban igen rideg, tehát nem szenved maradandó alakváltozást tönkremenetel előtt. Ez azt jelenti, hogy lényegében érzékelhető előjel nélkül következik be a törés [4].



Az amorf vagy más néven nemkristályos anyagok szilárdulása nem értelmezhető ugyanúgy, ahogy a kristályosoké. Hűtés során az üveg folyamatosan egyre viszkózusabb lesz, de nincs egy konkrétan meghatározható hőmérséklet, amikor folyadék halmazállapotból szilárdra alakul [5–7].

Amikor egy nemkristályos anyag emelt hőmérsékletéről hűl le, belső feszültségek, úgynevezett hőfeszültségek alakulhatnak ki az anyagban, amelynek oka a hűtési sebesség és termikus zsugorodás eltérése a felület és a belső régiók között. Ezek a feszültségek befolyásolják a mechanikai tulajdonságokat. Az üvegek anyagában szándékosan létrehozott nyomófeszültség létrehozását az üveg edzésének nevezik. Kalcium-nátrium üvegek esetében ~600 °C-os hűtés után gyors hűtéssel lehet létrehozni a belső feszültségeket. Ekkor a felület hőmérséklete gyorsabban csökken, majd üvegesedés után rideggé válik és összehúzódik, míg a belső részek még melegek és lassan hűlnek. Ebben az esetben a külső rész viszkozitása megnő és kevésbé tud alakváltozást szenvedni, miközben a belső rész még zsugorodna a hűlés hatására. Mivel a zsugorodást korlátozza a külső rész, a két felület között húzó- és nyomófeszültség alakul ki (1. ábra) [7].

Az edzett biztonsági üveg tönkremenetele a legkevésbé veszélyes, hiszen amellet, hogy sokkal nagyobb erőhatásra van szükség a töréshez, annak létrejöttékor kicsi, de nem éles darabokra esik szét az anyag, amelyeket a középső fólia az esetek többségében egyben is tart [8]. Ez jelentősen biztonságosabb, mint a kezeletlen síküveg, mivel sokkal kisebb személyi sérülés keletkezhet [9, 10].



1. ábra. Keresztmetszeti maradófeszültség-eloszlás szobahőmérsékletű edzett üveg lemezben [7] alapján

Rideg anyagok kvázistatikus károsodása általában egy jellemzően tükörsima, kisméretű felületről indul ki, melynek környezetében a szakirodalomban „mist”-nek nevezett fátyolos felület képződik, ezt követi a „hackle” tús, térben terjedő, a tükörsima felülethez képest radiális irányú repedés [11–13].

Az üvegek dinamikus behatásra jellemzően kétféle módon károsodhatnak. Létrejöhetnek radiális repedések, amelyek hengeres próbatest esetén a felület normálisának sugárirányában terjednek, két vagy több részre bontva a felületet [14]. Ezek jellemzően minden üveg károsodásánál fellépnek. Beszélhetünk továbbá körkörös repedésekről is, ezek általában megállítják a radiális repedéseket, így egy jelentősen kisebb kiterjedésű károsodás lép fel az anyagban. Utóbbi károsodási mód az edzett üvegekre jellemző [15, 16].

## 2. Eszközök és módszerek

Kutatásunk célja az edzett üveg töretfelületének és törési tulajdonságainak megismerése által megbecsülhetővé tenni adott mechanikai terhelés és hőmérséklet hatására bekövetkező károkat és törési folyamatokat.

A hajlítóvizsgálatokhoz hagyományos kalcium-nátrium síküvegből készítettünk 5×15×100 mm-es hasáb alakú próbatesteket (1. táblázat). A próbatesteket élcsiszoltuk, majd pedig edzettük 610 °C-on 2 órán át, végül áramló levegőn hűtöttük le. A mintákat három különböző hőmérsékletre hevítettük (23 °C, 300 °C, 600 °C), majd kvázistatikus terheléssel hárompontos hajlítóvizsgálatot végeztünk rajtuk Instron 5965 univerzális anyagvizsgáló berendezéssel, 1 mm/min terhelési sebességgel.

1. táblázat. A felhasznált üveg anyagösszetétele

	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Mennyiség (%)	74	16	5	4	1

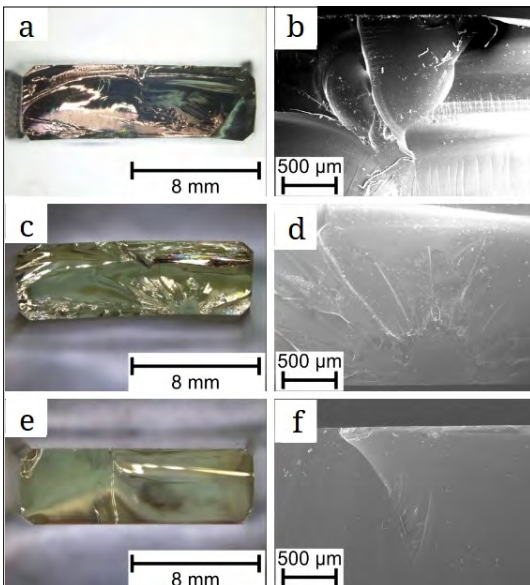
A kvázistatikus vizsgálatok mellett pneumatikus lövészerkezettel dinamikus terhelővizsgálatot végeztünk 700 mm távolságról, Ø6 mm-es acélgolyó 100 m/s sebességű becsapódásával. Ezeket a vizsgálatokat 5 mm vastag biztonsági üvegből készült személygépjármű-szélvédőn végeztük, amely kétrétegű, a rétegek között polivinil-butirál (PVB) fóliával laminált. A szélvédő befoglaló méretei: 1000×1600 mm, alátámasztása a két rövidebb él mentén történt. A hagyományos síküveg próbatestek szintén 5 mm vastagok voltak, befoglaló

méretei 200×200 mm, szintén két él mentén alátámasztva.

A kísérletek elvégzése után a töretfelületeket Olympus SZX16 sztereomikroszkóppal és Zeiss EVO MA10 pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) vizsgáltuk, továbbá a dinamikus behatás lefolyását FASTCAM SA5 model 775K-C3 nagy sebességű kamerával rögzítettük.

### 3. Az eredmények értékelése

A kvázistatikus vizsgálatok során az edzett síkúvegek jellegzetesen törtek, egyértelműen nem meghatározható repedéskeindulási pontokkal. A próbatestek a törés mentén szobahőmérsékleten egyáltalán nem élesek, viszont több irányba indul meg egyszerre a repedés (2. ábra). Élesnek nevezzük azt, amikor síkmetszetben az él csúcspontját a szomszédos két völgy alsó pontjával összekötő egyenesek hajlásszöge <90°. Különösen érdemes kiemelni a 300 °C-on létrejött töretet, amelyben a repedés egy kisméretű síkfelületből indul ki, majd a térben terjed tovább (2. ábra c, d). A 600 °C-on hajlított próbatest már nem mutatja a kisebb hőmérsékleten jellemző tulajdonságokat, és éles felület képződik, amely veszélyes (2. ábra e, f). Ennek oka, hogy az üvegek edzése 610 °C-on történt, amely a 600 °C-os hőmérséklet-hez már igen közel áll, így az edzés során kialakult belső feszültségek csökkennek.



2. ábra. Hárompontos hajlítóvizsgálat során létrejött töretfelületek sztereomikroszkópos képe balra és SEM-felvétele jobbra (23 °C a, b; 300 °C c, d; 600 °C e, f)

A hárompontos hajlítóvizsgálatok eredményét feldolgozva meghatározható a különböző hőmérsékleteken mért, a próbatestet jellemző hajlítószilárdság (1) és rugalmassági modulus.

$$R_{mh} = \frac{M}{K} = \frac{F_m L}{\frac{4}{ab^2}} = \frac{3F_m L}{2ab^2} \quad (1)$$

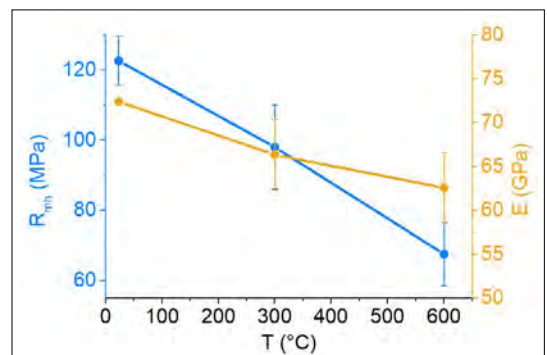
ahol:

- $F_m$  – a maximális fellépő erő (N),
- $L$  – az alátámasztási távolság (mm),
- $a$  – a vizsgált próbatest szélessége (mm),
- $b$  – a vizsgált próbatest magassága (mm).

A 3. ábra mutatja ezek jellegét. Megfigyelhető, hogy mindkét jellemző a hőmérséklet növelésével csökken. Ez alapján elmondható, hogy az anyag vizsgált mechanikai tulajdonságai romlanak, és az üvegek felhasználhatósága korlátozott az extrém körülmények között. A jelenség magyarázható azzal, hogy a 600 °C már üvegesedési hőmérséklet fölött van a vizsgált üvegeknél, azaz jelentősen lecsökken a viszkozitása.

A dinamikus vizsgálatok esetén a becsapódáskor a biztonsági üvegekre jellemző töret alakul ki 0,100 ms alatt. Az ebben lévő repedések a későbbiekben nem terjednek tovább (4. ábra). A becsapódási ponton finom üvegporszemek jelennek meg, hiszen ott roncsolódik az anyag a leginkább.

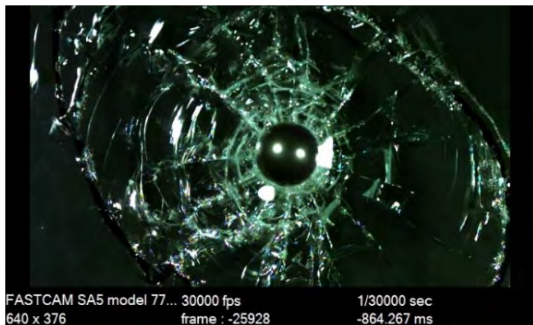
Megfigyelhető, hogy a becsapódás környezetében körkörös, pókhálószerű repedések jöttek létre, amelyek megállítják a további radiális repedésterjedést, így a károsodás csak kis területre terjed ki. Fontos még megjegyezni, hogy a szélvédők külső oldalát vizsgáltuk, hiszen a belső oldala felől nem jellemző a dinamikus behatás.



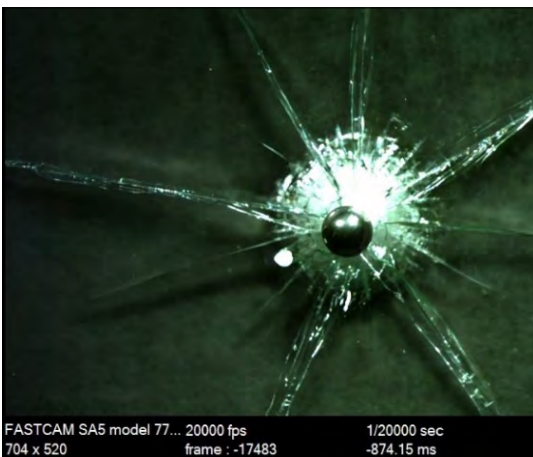
3. ábra. A hajlítószilárdság és rugalmassági modulus hőmérsékletfüggése

A vizsgálatok során a belső üvegréteg nem károsodott.

A dinamikus vizsgálatokat elvégeztük ugyanolyan alapanyagú nem edzett üvegeken is, referenciaképp (5. ábra). Megfigyelhető, hogy több repedés radiálisan terjed, és ezek a minta széléig kifutnak, majd az üveglap különböző méretű, éles szilánkokra esik szét.



4. ábra. Nagy sebességű kamerás felvétel a golyó becsapódásáról a becsapódás pillanatában és 0,100 ms-mal később



5. ábra. Ca-Na síküveg dinamikus terhelés hatására létrejött tönkremenetele

#### 4. Következtetések

A kvázistatikus vizsgálat terhelési folyamatában a vizsgált, edzett üvegek apró darabokra törtek, és tompa élek, elágazó repedések jellemezték szobahőmérsékleten. A kevésbé sérülésveszélyes élek létrejötte összefüggésben van a sok repedésel és az apró leválásokkal a belső feszültségek következtében, így a belső feszültségek miatt tompább felület jön létre. 300 °C-on még nem jelentkezik lényeges különbség a töretek jellege között, 600 °C-on a töretfelület kevésbé felosztott, viszont a töretek hegyesek, érintésre élesek.

A dinamikus vizsgálatokkal megfigyeltük az edzett üveg válaszait nagy sebességű, pontszerű behatásra. A szélvédők a kis hatókörű, nagy sebességű behatásoknak (pl. felpattanó kőnek) is jól ellenállnak, ekkor a törés kis térfogatra koncentrálódik. A külső üveg és a PVB-réteg energiaelnyelő képessége akkora, hogy vizsgálatunk alatt a második, azaz belső üvegrétegig már el sem jutott a károsodás.

Összességében megállapítható, hogy a kalcium-nátrium alapanyagú edzett üveg nem alkalmazható biztonságtechnikai célból nagy hőmérsékletre hevítés után, azonban kis hőmérsékleten ideálisabb a tönkremenetele, azaz jelentősen biztonságosabb a hagyományos, ugyanolyan alapanyagú üvegnél.

#### Köszönetnyilvánítás

Az eredmények közzétételéhez anyagi hozzájárulást nyújtott a BME Tudományos Diákköri Bizottságának TDK-pályázata.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Chen J. et al.: Experimental investigation on the radial and circular crack propagation of PVB laminated glass subject to dynamic out-of-plane loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 112–113. (2013) 26–40.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfrac-mech.2013.09.010>
- [2] Huang J. et al.: A study on correlation of pedestrian head injuries with physical parameters using in-depth traffic accident data and mathematical models. *Accident Analysis and Prevention*, 119. (2018) 91–103.  
<https://doi.org/10.1016/j0ap.2018.07.012>
- [3] Xu J. et al.: Experimental study on mechanical behavior of PVB laminated glass under quasi-static and dynamic loadings. *Composites: Part B*, 42. (2011) 302–308.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.10.009>
- [4] Vogel W.: *Glass Chemistry*. Second Edition, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg–Berlin, 1994.

- [5] Shackelford J. F., Doremus R. H.: *Ceramic and Glass Materials – Structure, Properties and Processing*. First Edition, Springer Science + Business Media LLC, New York, 2008.  
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-73362-3>
- [6] Callister W. D. Jr.: *Materials Science and Engineering – An Introduction*. Seventh Edition, John Wiley & Sons Inc, New York, 2007.
- [7] Kingery W. D., Bowen H. K., Uhlmann D. R.: *Introduction to Ceramics*. Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 1976.  
<https://doi.org/10.1149/1.2133296>
- [8] Nielsen J. H., Bjarrum M.: Deformations and strain energy in fragments of tempered glass: experimental and numerical investigation. *Glass Structures & Engineering*, 2. (2017) 133–146.  
<https://doi.org/10.1007/s40940-017-0043-8>
- [9] Fennelly L. J.: *Effective Physical Security*. Fifth Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2017.
- [10] Yong Peng et al.: Investigation of the fracture behaviors of windshield laminated glass used in highspeed trains. *Composite Structures*, 207. (2019) 29–40.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.009>
- [11] Tandon R., Glass S. J.: Fracture initiation and fragmentation in chemically tempered glass. *Journal of the European Ceramic Society*, 35. (2015) 285–295.  
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceram-soc.2014.07.031>
- [12] Freiman, S. W., Wiederhorn, S. M., Mecholsky, J. J. Jr.: Environmentally enhanced fracture of glass: a historical perspective. *Journal of the American Ceramic Society*, 92/1. (2009) 1–112.  
<https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03097.x>
- [13] Bradt R. C.: The Fractography and Crack Patterns of Broken Glass. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 11. (2011) 79–96.  
<https://doi.org/10.1007/s11668-011-9432-5>
- [14] ISO/TS 20746: *Dentistry. Determination of the strength of dental amalgam by the Hertzian indentation strength (HIT) method*, 2016.
- [15] Ahearn D. L. III et al.: Fracture patterns of impact resistant glass panel laminates with annealed and heat strengthened glass plates. *Ceramic Transactions Series*, 199. (2007) 383–396.  
<https://doi.org/10.1002/9781118144152.ch31>
- [16] Knight C. G., Swain M. V., Chaudhri M. M.: Impact of small steel spheres on glass surfaces. *Journal of Materials Science*, 12. (1977) 1573–1586.  
<https://doi.org/10.1007/BF00542808>



# A fókuszált lézernyaláb keresztmetszeti jellemzőinek szerepe az impulzusos üzemű lézeres vágásnál

## Role of the Features of Focused Laser Beam in Pulsed Laser Cutting

Meszlényi György,<sup>1</sup> Bitay Enikő<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup> Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország, meszlényi.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu

<sup>2</sup> Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Marosvásárhely, Románia

<sup>3</sup> Erdélyi Múzeum-Egyesület, Műszaki Tudományok Szakosztálya, Kolozsvár, Románia, bitay@eme.ro

### Abstract

In this article investigation of the roles of two important factors of focused laser beam, the focal spot diameter and the Rayleigh length as determining variables of the beam quality were analysed. The equations of these two factors are based on those most commonly used in the literature. The exchange between three different beam quality numbers were shown. It is proven on the basis of the scientific literature, that the beam quality degrades compared to the original data given by the factory of laser. The causes of the beam quality degradation are lens aberrations in the optical path of the given laser, and the shifting of the beam propagation ratio ( $M^2$ ) to higher values. A new equation for estimation of the new, lowest value for  $M^2$  factor is presented, based on the comparison of the laser cut material thickness to the depth of focus, which is two times the Rayleigh length.

**Keywords:** laser cutting, laser beam, beam diameter, beam quality, beam propagation ratio ( $M^2$ ), Rayleigh length.

### Összefoglalás

Jelen cikkben a fókuszált lézernyaláb keresztmetszete két fontos jellemzőjének, a fókuszfoltátmérőnek és a Rayleigh-hossznak mint a szakirodalomban legelterjedtebb képleteiben szereplő változóknak a hatását elemeztük. A mindkét képletben szereplő, a nyalábminőséget kifejező változók egymásba való átváltását ismertettük, és a szakirodalom alapján bebizonyítjuk, hogy a lézereknél a gyárilag megadott értékekhez képest a lézernyaláb optikai sugármenetében lévő lencsék hibái miatt a nyalábminőség romlani fog, tehát az  $M^2$  tényező értéke nő. A megnövekedett  $M^2$  változó alsó határának becslésére bemutatunk egy új összefüggést, mely az átvágott anyagvastagság és a kétszeres Rayleigh-hossz mint fókuszmélység egyeztetésén alapul.

**Kulcsszavak:** lézersugaras vágás, nyalábkeresztmetszet, nyalábátmérő, nyalábminőség, Rayleigh-hossz.

## 1. Bevezetés

Lézersugaras 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. Miért fontos tudni, hogy mekkora a fókuszfoltátmérő? Mert ki-

sebb fókuszfoltátmérővel lézersugaras vágásnál kisebb vágási rés, emiatt kisebb salakmennyiség érhető el, tehát jobb vágási minőséget kapunk, kevesebb utómegmunkálásra van szükség. A kevésbé szétterülő nyaláb miatt a hőhatásövezet is kisebb. A fókuszfolt átmérőjének képletei több szakirodalomban megegyeznek, csak a közös formátum eléréséhez néhol meg kell duplázni a

sugarat, hogy az átmérőt megkapjuk, és a nyalábminőség-adatokat át kell számítani: a K nyalábterjedési tényező reciprokját, az  $M^2$  nyalábminőség tényezőt beírva a képletbe (ld. 2. pont) [1], [2], [3], [4]:

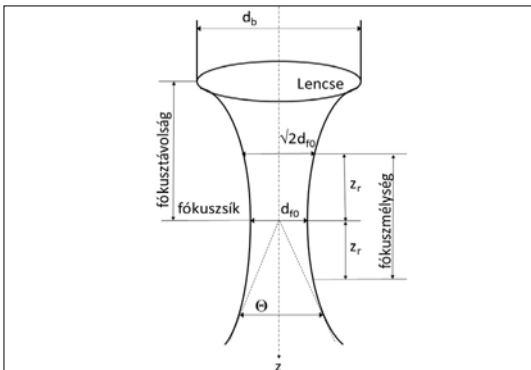
$$d_{f0} = \frac{4\lambda f M^2}{\pi d_b} \tag{1}$$

Itt  $\lambda$  a lézer hullámhossza,  $f$  a lézernyalábot a munkadarabra fókuszáló lencse fókusz-távolsága,  $M^2$  a nyalábminőség tényező, mely megmondja, hogy az ideális Gauss-nyalábhoz képest hány-szoros a vizsgált nyalábnak a fókuszfoltátmérője,  $d_b$  a fókuszálólencse előtti közel kollimált lézernyaláb átmérője. Ha a fókuszáló lencsére eső közel kollimált lézernyalábot tágítjuk, akkor az alul szereplő  $d_b$  nyalábtátmérő szorozódik a nyalábtágító faktorával, vagyis egy mértékegység nélküli számmal ( $B_e$ ), ami megmondja, hogy hány-szoros lett a nyaláb átmérője a tágítatlanhoz képest [1]:

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

A Rayleigh-hossz a nyalábterjedés irányában a fókuszstíktól mért azon hossz, amely végén a lézerfolt területe duplájára, így a nyaláb rádiusza gyök kétszeresére nő, ezért a felületegységre jutó impulzusenergia a felére esik vissza a fókuszfoltban számíthatóhoz képest. Általában a Rayleigh-hossz kétszeresen belül tekintik fókuszban levőnek a nyalábot, ezt nevezzük fókuszmélységnek, tehát ha lézeres vágásról van szó, körülbelül ilyen vastag anyagot tud átvágni a lézer. Képlete nagyon hasonló a lézerfoltátmérő képletéhez, csak itt a fókuszálólencse fókusz-távolsága és a lencse előtti nyalábtátmérő a négyzetben szerepel [1], [4]:

$$z_r = \pm \frac{4\lambda M^2 f^2}{\pi d_b^2 B_e^2} \tag{3}$$



1. ábra. A fókuszált lézernyaláb eddig tárgyalt jellemzőinek szemléltetése

A fókuszált lézernyaláb eddig tárgyalt jellemzőit az 1. ábra szemlélteti, ahol a z-koordináta a lézernyaláb terjedési irányába mutat,  $\Theta$  a fókuszált nyaláb széttartási szöge. Az 1. ábra az [1] és az [5] szakirodalom ábráinak egyesített jellemzői alapján készült. A nyalábminőséget tárgyalják a következő cikkek: [6], [7], [8], [9].

### 2. A nyalábminőség mérőszámai

A fókuszált nyalábkeresztmetszet két legfontosabb jellemzője a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz definíciójában szereplő nyalábminőség tényező. Jó, ha tudjuk, milyen megadási módjai vannak a nyalábminőségnek, és azt is, hogyan lehet ezeket egymásba átváltani.

A nyalábparaméter szorzat (BPP) a lézernyaláb fókuszálhatóságát fejezi ki, melyet leggyakrabban a rezonátorbeli nyalábderéksugár és a távoli mező divergenciaszöge,  $\Theta_\sigma$  szorzataként adnak meg, amit 4-gyel elosztanak. Itt  $\Theta_\sigma$ : a táguló nyalábot burkoló aszimptotikus kúp nyílásszöge [10]:

$$BPP = \frac{d_{\sigma 0} \Theta_\sigma}{4} \tag{4}$$

A harmadik megadási mód a nyalábminőség tényező, annak a mértéke, hogy mennyire közelíti meg a nyalábparaméter szorzat az ideális Gauss-nyaláb diffrakciós határát [10]:

$$M^2 = \frac{\pi d_{\sigma 0} \Theta_\sigma}{\lambda} \tag{5}$$

A másik megadási mód a K nyalábterjedési tényező, mely  $M^2$  reciproka: [10].

$$K = \frac{1}{M^2} \tag{6}$$

$M^2$  nem ideális nyalábra  $> 1$ , és  $K < 1$ . A fenti képletekből következik, hogy ha a három, a nyalábminőséget jellemző változóból egy adva van, akkor a többi ebből számolható, de ehhez a lézer hullámhosszát is kell tudni, és a mértékegységek átváltására oda kell figyelni.

### 3. A nyalábminőség tényező lehetséges változásának hatása fókusz-foltátmérőre és a Rayleigh-hosszra.

Előrebocsátom, hogy a nyalábminőség tényező méréséről az ISO11146 szabvány rendelkezik. A korrekt méréshez „a fókusz környezetében, a sugártengely mentén legalább tíz helyen meg kell mérni a lézernyaláb  $d(z)$  átmérőjét. A mérési helyek felének a Rayleigh-hosszon ( $z_R$ ) belülre kell esnie, a másik felének a Rayleigh-hossz két-

szeresén kívül” [11]. A nyalábminőség tényező és a fókuszált nyalábkeresztmetszet méréséhez e dolgozatban vizsgált impulzusüzemű lézereknél a nem folyamatos lézerműködés miatt nem használhatóak az egyszerűbb késélszkennelő vagy részszenkelő módszerek, hanem mátrixérzékelős detektorra, illetve a detektor nagy érzékenysége miatt többfokozatú nyalábgyengítésre van szükség, olyan módon, ami nem befolyásolja a mérés eredményét: nem torzíja az eredetileg mérendő nyaláb jellemzőit [11]. Ezek nagyon drága eszközök, egy ilyen eszköz ingyenes használatáról tárgyaltunk a tulajdonos céggel. Sajnos ilyen feltételek mellett ingyenes kiszállás, eladás lehetősége nem áll fenn, nem álltak szóba velünk.

Amit az alábbiakban be szeretnénk mutatni: milyen a nyalábminőség tényező lehetséges változásának hatása a fókuszfoltátmérőre és a Rayleigh-hosszra. Ez a fent röviden idézett valóság egy leegyszerűsített modellje, mely mégis hasznos eredményekhez vezet. Azért is lehet megvizsgálni ezt a közelítést, mert a vizsgált lézerek móduszerkezete az ideális Gauss-nyalábot megközelítő TEM<sub>00</sub> közeli a szerviz közlése alapján. Egyszerűbben kezelhető és vizsgálható így a fókuszált nyalábkeresztmetszet lehetséges változása, annak becslése e két mennyiség vizsgálatán keresztül. Ami még indokolja ezt az elemzést, az, hogy a lézersugaras megmunkáláskor a nyaláb fókuszfolt közeli részét használjuk, érdekes, hogy hol van a fókusz, mekkora a fókuszfoltátmérője és a kétszeres Rayleigh-hossz, amin belül dolgozni lehet a lézerrel. 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 fókuszszík z-koordinátája [1]:

$$d_f(z) = d_{f0} \sqrt{1 + \left(\frac{z - z_0}{z_r}\right)^2} \quad (7)$$

Felidézve a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz képletét, analizáljuk, hogy mitől függ a képletek eredménye, mindkét képletben (2 és 3) ugyanazok a mennyiségek szerepelnek, ezt az analízist a korábbi cikkeinkben [12], [13], [14], [15], [16] elvégzett vágási kísérletekhez kötjük.

- A hullámhossz: a kísérletekben használt Nd:YAG lézer hullámhossza, elhanyagolható módon változik.
- A fókuszálólencse fókusz távolsága állandó: 50 mm volt.

- A fókuszálólencse előtti közel kollimált lézernyaláb-átmérő egyenlő a tágitatlan nyalábátmérő db szorozva a nyalábtagító szorzószámmal. Be: adott nyalábtagító állásnál mindkettő konstans, a nyalábtagító hatását később vizsgálom.
- A képletekben szereplő többi tényező konstans.

Most vizsgáljuk meg a nyalábminőség tényező változásának általam megtalált eseteit, melyek általában a gyárilag megadott nyalábminőség romlását, ezzel a fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz növekedését jelzik.

Ötféle információ, amelyből arra következtünk, hogy változik a nyalábminőség tényező:

1. A LASAG KLS 246 FC mikro megmunkálásra kifejlesztett Nd:YAG lézer hajlamos a termikus lencsézésre: nagyobb átlagteljesítménynél a kristályrúd közepe melegebb, jobban kitágul, mint a külső felülete: tehát a két vége átlagteljesítménytől függően változó görbületű lencseként működik. Hasonló effektus került leírásra az egyik szakirodalomban: [5]. A szerviz közlése szerint 5 W átlagteljesítményig  $M^2 = 3$ , a maximális 15 W átlagteljesítménynél  $M^2 = 5$ , a kettő között lineárisan változik.
2. A zoomos 8-fokozatú nyalábtagító mint optikai rendszer legalább 3 lencséből áll, mert 2 lencse kellene a Galilei-távcső rendszerű, fix nyalábtagításúhoz. Ezeknek a lencséknek is van képhibájuk, nézzük most a legerősebb hatását: a szférikus aberrációt. A szférikus aberráció lényege, hogy az optikai tengelytől sugárirányban eltávolodva minél kijebb lévő gyűrűt vizsgálunk, annál közelebb lesz a fókusz a lencséhez, tehát a fókuszfoltátmérő megnő. A LASAG szerviz azt írta, hogy 1-es nyalábtagító állásnál vegyük ki a nyalábtagítót, hiszen ekkor az csak átengedi a kollimált nyalábot, ez is arra utal, hogy a nyalábtagító ront a fókuszálhatóságon.
3. Kaplan könyve szerint [1] erős fókuszálásnál, kis  $F$ -számoknál nem igazak az  $r_{f0}$  fókusz sugár és  $z_r$  képletei, hanem korrekciókat kell bevezetni (itt  $F = f/d_b$ ):

$$r_{f0} = \frac{2\lambda F}{\pi K} + \frac{k_{sa} d_b}{2F^2} = \frac{2\lambda f}{\pi d_b K} + \frac{k_{sa} d_b^3}{2f^2} \quad (8)$$

Tipikus értékek  $n$  törésmutatójú lencsékre és a lencsék aberrációit korrigáló  $k_{sa}$  faktorokra a lencse anyagától függően a következők:

ZnSe  $n=2,40$ ,  $k_{sa}=0,0312$

GaAs  $n=3,27$ ,  $k_{sa}=0,0139$

Egy dolog biztosan kiderül ebből az egyenletből:  $r_{f0}$ , ezzel együtt  $d_{f0}$  és  $z_r$  értéke nagyobb

lesz, tehát a nyaláb fókuszálhatósága romlik. Itt külön szerepel  $K$  nyalábterjedési tényező és a korrekció, én ezt „belegyűrnám”  $M^2$  tényező értékebe, mert nekem így lenne logikus, még akkor is, ha a szerző külön kezeli ezeket. A 4. pontban idézett cikkben ez a korrekció már  $M^2$  tényezőben szerepel. Két dolog miatt azonban ezekkel a korrekciókkal nem tudok számolni: az első, hogy a szerző nem mondja meg, hol a határa az erős fókuszálásnak. Nyilván nagy lencse előtti nyalábtátmérőt és kis fókusz távolságú lencsét jelent, azt sejttem, hogy a maximális nyalábtágító állás és az 50 mm-es fókuszálólencse idetartozik. A második, hogy nem ismerve a lencse anyagát, nem tudom, melyik korrekciós faktort válasszam.

4. Harp cikke [4]: A Practical method for determining the beam profile near the focal spot, mely egy rangos Springer-folyóiratban jelent meg, a fókuszált lézernyaláb elé ferdén elhelyezett anyagon hegesztési varratokat készítve elemezte az IPG Photonics gyártmányú 300 W, CW, Ytterbium Fiber Laser nyalábminőségét. A kezdeti nyalábminőség tényező  $M^2 = 1,04$  volt. A lézernyaláb 9  $\mu\text{m}$ -es százból lépett ki, és párhuzamosítás után 4,5 mm volt az átmérője. Ötszörös nyalábtágítót használtak a kisebb fókuszolt elérésére, mely után három különböző fókuszálólencsét próbáltak ki, sorra: 150 mm, 100 mm és 60 mm fókusz távolságúakat. A gyárilag megadott  $M^2$  értéket a cikkben először a lencsék meg nem nevezett optikai hibái miatt korrigálja: itt is a lencse fókusz távolságának négyzetével oszt a korrekcióban, az „a” tényezőt a hegesztési kísérletből veszi:

$$M^2 = M_0^2 + \frac{a}{f^2} \quad (9)$$

A cikkben az eredményeket összesítő diagram a 60 mm fókuszú lencsére vonatkozóan a fenti korrekcióval a kezdeti 1,05-ös  $M^2$  érték felmegy 2,5-re, a szférikus aberrációt is beleszámítva 6 körüli érték lesz.

5. Zimmermann cikkében [3] IPG gym. YLR-200-SM egymódusú szállézer vizsgál, a kollimált nyalábra megadja a fókuszálatlan nyalábtátmérőt, az ebből kiszámolt elvi fókuszoltátmérőt, a Rayleigh-hosszat és a teljesítménysűrűséget. De a valóságban a fókuszálólencse optikai hibái, elsősorban a szférikus aberráció megnöveli az elvileg elérhető fókuszolt méretet. A fókuszolt átmérő a fókuszálólencse előtti nyalábtátmérő köbével arányosan nő. ISO 11145 és 11146 szabvány szerinti késélszkennelő módszerrel

mérték a fókuszált nyaláb változóinak értékeit. A kísérleteknél vizsgálták a lézersugár terjedési irányába eső, a lézer teljesítményétől függő fókuszeltolódást, ami 89 mikrométeres Rayleigh-hosszat meghaladó 110 mikrométer körüli érték volt. Ezt a fókuszeltolódást a lézert vezető optikai elemek és foglataik felmelegedése okozza. Adatok a számoláshoz: hullámhossz: 1070 nm,  $M^2 < 1,1$ ; fókuszálólencse fókusz távolsága: 50 mm, eredeti nyalábtátmérő: 6,5 mm [4]. A kísérlet érdekessége, hogy a kétszeres nyalábtágítót egyszer tágítóként alkalmazták, így nagyobb lett a mért fókuszoltátmérő, mint az elvi érték (1. táblázat 3. sor), aztán kétszeresére szűkítették a nyalábot, így az elvi értékhez képest kisebb fókuszoltátmérőt kaptak (1. táblázat 1. sor). A szűkítés haszna, hogy nőtt a Rayleigh-hossz: vastagabb anyagot lehet megmunkálni.

A nyalábminőség romlását okozhatja a fókuszálólencse előtti védőüveg szennyeződése, melyet a munkadarabról visszafrocskölődő kicsi anyagcseppek is okozhatnak, ha ezt észleljük, ki kell cserélni a védőüveget.

1. táblázat. A [3] cikkbeli elvi kiszámolt értékek és a mérési eredmények összevetése

Nyalábtátmérő (mm)	3,25	6,5	13
Elvi fókuszolt átmérő ( $\mu\text{m}$ )	23	12	6
Elvi Rayleigh-hossz ( $\mu\text{m}$ )	355	89	22
Mért fókuszolt átmérő ( $\mu\text{m}$ )	20	14	9,4

#### 4. Az $M^2$ tényező romlásának becslése öt korábbi kísérletnél

Most egy új módszert mutatunk be, mellyel  $M^2$  tényező romlására egy alsó közelítést lehet adni a megmunkált anyagvastagság és a Rayleigh-hossz összehasonlításával. A korábban elvégzett öt kísérletnél LASAG KLS 246 FC lézert használtunk. A szerviz közlése alapján a lézerre  $M^2 (P_{\text{átlag}} = < 5\text{W}) = 3$  és  $M^2 (P_{\text{átlag}} = 15\text{W}) = 5$  és e két érték között lineáris. Ebből felírható az egyenes egyenlete  $y = 0,2x + 2$  ha  $5 < x < 15$ , ahol  $y$  az  $M^2$  tényező és  $x$  a  $P_{\text{átlag}}$ . Az első három kísérleti megmunkálás jellemzőit bemutató táblázatban (2. táblázat) így kiszámolható az  $M^2$  tényező, amely 3,7 és 4,2 közötti értékekre jön ki. Így a fókuszolt mérete és a Rayleigh-hossz első közelítése kiszámolható. A Rayleigh-hossz kétszerese sokkal kisebb volt, mint az átvágott anyag vastagsága, ezért újra korrigálnom kellett az  $M^2$  tényezőt.

A Rayleigh-hossz = az anyagvastagság ( $v_n$ ) fele



egyenletből (3) képletet átrendezve egy új egyenlet felállítva (10) kiszámoltam az új  $M^2$  tényező becsült értékét, ami 7 körüli értéket adott.

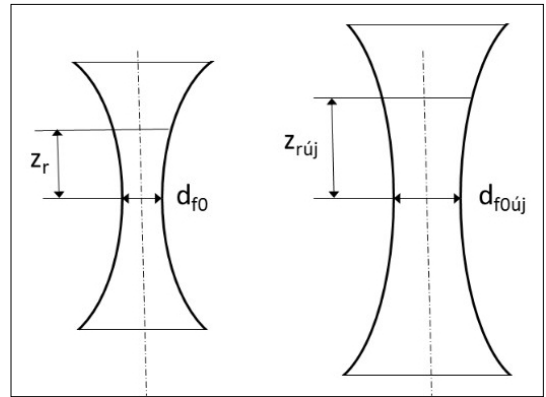
$$\frac{v_a}{2} \pi d_f^2 B_c^2 = M_{új}^2 \quad (10)$$

A kiszámolt új  $M^2$  tényezővel újra kiszámoltam a fókuszfolt átmérőjét, ami 20 mikrométer körüli volt, amiben az az érdekes, hogy 8-as nyalábtágítónál kb. ekkora volt a vágási rés (2. táblázat). A kapott eredményeket szemlélteti a 2. ábra: sikerült a kísérleti eredményekhez illeszteni a modell paramétereit.

A 0,4 mm-es 4-es nyalábtágítóval végzett lemezvágási kísérletre alkalmazva a fenti gondolatmenetet az  $M^2$  tényező a szerviz közlése alapján felállított egyenletből 3,8–4,8 közötti értékre jött ki. Az ennek alapján kiszámolt Rayleigh-hossz kétszerese most sem érte el az anyagvastagságot. A Rayleigh-hosszat egyenlővé téve az anyagvastagság felével  $M^2$ -re 5,9 jött ki, ami 1-gyel kisebb, mint a 8-as nyalábtágítónál (3. táblázat). Az eredmény megegyezik az eddig ismertett elemzésekével, nyilván ha csökken a lencserendszereken átvezetett nyaláb átmérője, ha 8-as helyett 4-es nyalábtágító szorzót alkalmazunk, akkor csökken a szférikus hiba, tehát javul a nyalábmínőség.

2. táblázat.  $M^2$  tényező és  $d_{f0}$  és  $z_r$  elméleti és az átvágott cső anyagvastagság alapján korrigált új értékei

	1. kísérlet [8]	2. kísérlet [9]	3. kísérlet [10]
Anyagvastagság (mm)	0,117	0,12	0,12
Művelet	vágás	vágás	vágás
Átlagteljesítmény	8–11,2 W	10–12 W	8,7 W
Közepes átlagteljesítmény	9,6 W	11 W	8,7 W
$M^2$ közepes átlagteljesítményen a szerviz adatai alapján	3,9	4,2	3,7
$d_{f0}$ (μm)	13,3	14,2	12,7
$\pm z_r$ (μm)	$\pm 33,2$	$\pm 35,6$	$\pm 31,7$
Az átvágott falvastagság miatt szükséges $z_{rúj}$ (μm)	$\pm 58,5$	$\pm 60$	$\pm 60$
Ebből kiszámolt új $M^2$ tényező	6,9	7,1	7,1
Ebből kiszámolt új fókuszfoltátmérő (μm)	23,4	24	24



2. ábra. A fókuszfoltátmérő és a Rayleigh-hossz elméleti és becsült  $M^2$  tényező alapján kiszámolt értékeinek szemléltetése

3. táblázat.  $M^2$  tényező és  $d_{f0}$  és  $z_r$  elméleti és az átvágott lemez anyagvastagság alapján korrigált új értékei

	4. kísérlet [11]	5. kísérlet [12]
Anyagvastagság (mm)	0,4	0,4
Anyageometria	lemez	lemez
Anyagminőség	AISI 304L	AISI 304L
Művelet	vágás	vágás
$P_{\text{átlag}}$	12,5–16	9,2
Nyalábtágító szorzó	4	4
Közepes átlagteljesítmény	14,25 W	9,2 W
$M^2$ közepes átlagteljesítményen a szerviz adatai alapján	4,85	3,84
$d_{f0}$ mikrométer	32,87	26,02
$\pm z_r$ mikrométer	$\pm 164,3$	$\pm 130,12$
Az átvágott falvastagság miatt szükséges $z_{rúj}$ (μm)	$\pm 200$	$\pm 200$
Ebből kiszámolt új $M^2$ tényező	5,9	5,9
Ebből kiszámolt új fókuszfoltátmérő (μm)	40	40

## 5. Összefoglalás

A cikkben a fókuszált lézernyaláb keresztmetszete két fontos jellemzőjének, a fókuszfoltátmérőnek és a Rayleigh-hossznak mint a szakirodalomban legerősebben szereplő változóknak a hatását elemeztük. A mindkét képletben szereplő, a nyalábmínőséget kifejező változók egymásba való átváltását ismertetjük,

és a szakirodalom alapján bebizonyítjuk, hogy a lézereknél a gyárilag megadott értékekhez képest a lézernyaláb optikai sugármenetében lévő lencsék hibái miatt a nyalábmínőség romlani fog, tehát  $M^2$  tényező értéke nő. A megnövekedett  $M^2$  változó alsó határának becslésére bemutatunk egy új összefüggést, mely az átvágott anyagvastagság és a kétszeres Rayleigh-hossz mint fókuszmélység egyeztetésén alapul.

### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kaplan A. F. H.: *Theoretical Analysis of Laser Beam Cutting*. Shaker Verlag, Aachen, 2002. 12–14. ISBN 3-8322-0803-8
- [2] Paripás B., Szabó Sz., Kocsisné Baán M., Tolvaj B., Bencs P.: *Lézeresmérési és megmunkálási eljárások a gépészetben*. Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009. 66–67.
- [3] Zimmermann M., Mys I., Schmidt M.: *Micro cutting of thin sheets with single mode fiber lasers*. Laser assisted net shape engineering 5. Proceedings of the LANE, 2007. 220–224.
- [4] Harp W. R., Paleocrassas A. G., Tu J. F.: *A Practical method for determining the beam profile near the focal spot*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 37. (2008) 1113–1119. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1067-z>
- [5] Wirth P.: *Introduction to Industrial Laser Materials Processing*. Hamburg, Germany, Rofin-Sinar Laser, 2000. 14–59.
- [6] Hemmerich M., Thiel C., Lupp F., Hanebuth H., Weber R., Graf T.: *Reduction of Focal Shift Effects in Industrial Laser Beam Welding by Means of Innovative Protection Glass Concept*. 8 th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014. Physics Procedia, 56. (2014) 681–688. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.161>
- [7] Rodrigues C., Vanhove H., Duflou J. R.: *Direct diode lasers for industrial laser cutting: a performance comparison with conventional fiber and CO<sub>2</sub> technologies*. 8 th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014. Physics Procedia, 56. (2014) 901–908. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.109>
- [8] Thombansen U., Hermanns T., Stoyanov S.: *Setup and Maintenance of Manufacturing Quality in CO<sub>2</sub> Laser Cutting*. 2<sup>nd</sup> International Conference on Ramp-Up Management 2014 (ICRM). Procedia CIRP, 20. (2014) 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.05.037>
- [9] Hashemi S. S., Sabouri S. G., Khorsandi A.: *In situ measurement of laser beam quality*. Applied. Physics B (2017) 123–233. Springer-Verlag GmbH Germany, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00340-017-6811-y>
- [10] MSZ EN ISO 1145 Optika és fotonika. Lézerek és lézerberendezések. Szakszótár és jelképek (ISO 1145:2018)
- [11] Buza G.: *Lézersugaras technológiák I*. Edutus Főiskola, 2012. 24–29.
- [12] Meszlényi Gy., Dobránszky J., Puskás Zs.: *Laser cutting of high precision tubes*. Material Science Forum, 589. (2008) 427–431. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.589.427>
- [13] Meszlényi Gy., Bella Sz., Nagy P., Dobránszky J.: *Laser beam cutting and welding of coronary stents*. BID-ISIM Welding and material testing, (2008) 14–11.
- [14] Meszlényi Gy., Izápy V.: *Optimization method of laser cutting parameters for high precision stainless steel tubes*. In: Proceedings of the SIP 2008, 26<sup>th</sup> International Conference Science in Practice Osijek, Horvátország, 2008. 95–97.
- [15] Meszlényi Gy., Dobránszky J., Dévényi L.: *Laser cutting of stainless steel thin sheets with pulsed Nd:YAG laser*. 6. In: Országos Gépészeti Konferencia, Gépészet 2008, Budapest. Magyarország, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2008. 1–5.
- [16] Meszlényi Gy., Dobránszky J., Puskás Zs.: *Role of the laser focus position in the laser beam cutting of thin stainless steel sheets*. Material Science Forum, 659. (2010) 209–214.

## Additív gyártás alkalmazása a kovácsszerszám-javításban

### Application of Additive Manufacturing for the Repair of Forging Dies

Uzonyi Sándor

*Flexman Robotics Kft. Budapest, Magyarország, us@flexmanrobotics.hu*

---

#### Abstract

In this paper the investigated conditions and possibilities of repairing forging dies with high precision robotic MAG welding are presented. Different welding wire electrodes were examined and compared by their processability. Productivity, process stability, slag and fume formation were in the focus of investigation. Metallographic tests were carried out to validate the compliance of welded layers. Based on the performance of the wire electrodes, recommendations have been elaborated for the procedure specification and also for further investigation. Some robot cell lay-outs have been designed adapting to the special working environment and requirements of the welding procedure.

**Keywords:** *additive manufacturing, wire arc additive manufacturing, robotic welding, hardfacing.*

#### Összefoglalás

A dolgozat célja kovácsszerszámok javító-felrakó hegesztésének robotizálására alkalmas hegesztőhuzal kiválasztása, a hozzá tartozó hegesztéstechnológia kidolgozása és validálása volt. A munka során többféle huzalelektrodát hasonlítottam össze. Az összehasonlítás középpontjában a feldolgozhatóságot befolyásoló tulajdonságok voltak, mint a termelékenység, az ívstabilitás, a salak- és füstképződés. Az elkészült kemény rétegeket metallográfiai módszerekkel vizsgáltam, hogy kötésminőség szempontjából is megfelelőek-e. A munka során gyűjtött tapasztalatok figyelembevételével mellett a konkrét alkalmazást megvalósító robotcella kialakítására is dolgoztam ki koncepciókat.

**Kulcsszavak:** *additív gyártás, huzalelektrodás ívhegesztéses additív gyártás, robotosított hegesztés, javítóhegesztés.*

---

## 1. Bevezetés

### 1.1. Célkitűzés

A Flexman Robotics Kft. ügyfélkörében érdeklődés merült fel a megalakító szerszámacélok javítóhegesztésének robotosítására, a hegesztőanyag-felvitel pontosságának növelése érdekében, ezzel csökkentve a hegesztési és megmunkálási időt, valamint az ehhez kapcsolódó költségeket. A kutatómunka célja erre alkalmas hegesztőanyag, ehhez tartozó hegesztéstechnológia és robotrendszer tervezése volt. Ehhez kísérleteket végeztem a javítani kívánt szerszámacél hegeszt-

hetőségének értékelésére, melyek közben értékeltem a vizsgált hegesztőanyagok felhasználhatóságát és a technológia megbízhatóságát leginkább befolyásoló tényezőket, majd az elkészült kemény rétegeket metallográfiai vizsgálatoknak vetettem alá, a felhasználás során alkalmazott technológia validálása érdekében.

### 1.2. A felrakóhegesztés fő jellemzői

A felrakóhegesztés széles körben alkalmazott eljárás karbantartási, javítási munkák során, illetve olyan termékek előállításakor, melyek felülete lényegesen eltérő tulajdonságú kell hogy

legyen a keresztmetszet belsejéhez képest. Felrakóhegesztés alkalmazásakor jellemzően az egész felületet egy vagy több rétegben hegesztik fel, illetve anyaghiány pótlásakor, annak környezetét részben vagy egészben eltávolítva, az eredeti folytonossági hiánynál sokkal nagyobb részt hegesztenek fel. A precizitás növeléséhez az ilyen tevékenységet végző vállalatnak szoros gazdasági érdeke fűződik. A felrakóhegesztés hegesztőanyagai igen drágák, illetve a felhegesztett többletanyagot utólag forgácsolással el kell távolítani, ami szintén nagyon költséges, mivel ezek az anyagok általában nehezen forgácsolhatók [1].

A hagyományos felrakóhegesztés és az additív gyártás között a pontosság teremt kapcsolatot, amit szerzőtársaimmal korábban részletesen elemeztünk [2]. A huzalelektrodás ívhegesztéssel végzett additív gyártás (angolul WAAM, wire and arc additive manufacturing) területén lényeges előrelépések történtek az elmúlt években. Egyre több gyakorlati alkalmazás születik, és a nagy pontosságú szerszámjavítással foglalkozó cégek száma is gyarapodik [3–5].

### 1.3. A hegeszthetőség vizsgálata

A kopott, elhasználódott szerszámok szakszerű javítása jelentős haszonnal járhat, ugyanis az eredetinek megfelelő minőség elérésén túl, a hegesztőanyag és technológia körültekintő kiválasztásával, az eredetinél hosszabb élettartam is lehetséges. Egy szerszámot akár többször is lehet javítani, így a jól megtervezett javító-felrakó hegesztési technológia igen költséghatékony [6].

A szerszámacélok, hegesztésüket tekintve, két nagy csoportba oszthatók: erősen ötvözött, valamint közepesen ötvözött és ötvözetlen szerszámacélok. Jelentős részük az edzési hőmérsékletre körülbelül 30 min alatt az előmelegítési hőmérsékletre hűtve hosszú ideig lágy, ausztenites marad. Ebben a hőmérséklet-tartományban maradvá hosszú ideig dolgozhatunk repedésveszély nélkül. Erősen vagy gyengén ötvözött szerszámacélok hegesztésére általánosan elterjedt és nagy biztonsággal alkalmazható módszer ez, azonban nem mindig engedhető meg ilyen nagymértékű előmelegítés [1]. Az általam vizsgált, EN ISO 4957 szerinti jelöléssel: 55NiCrMoV7 (rövid jel: 1.2714), szerszámacélból készült szerszám sem melegíthető elő ebbe a tartományba. Az előmelegítés és a hozzá tartozó fajlagos hőbevitel meghatározására számos módszert dolgoztak már ki, de ezek a nagy szénegyenérték miatt nem, vagy csak különleges megfontolásokkal alkalmazhatók. Ezek közül többet is megvizsgáltam, itt csak kettőt mutatok be.

#### 1.3.1. A Kasuya–Yurioka-módszer

Egy lehetséges közelítés a nagy széntartalmú acélok 50% martenzitet eredményező lehülési idejének meghatározásához tartozó számítási módszer. Ezt a módszert T. Kasuya és N. Yurioka pontosítottá [7] a CEH Harden-féle szén-egyenérték [8] felhasználásával:

$$T_{50} = (T_m \cdot T_b)^{0.5} = \exp(5,3CE_H + 3,1CE_{III} - 2,03)$$

$$CE_H = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cr}{8} + \frac{Mo}{4} + \Delta H$$

$$CE_{III} = C + \frac{Mn}{3,6} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} \quad (1)$$

$$T_m = \exp(10,6CE_H - 4,8)$$

$$T_b = \exp(6,2CE_{III} - 0,74)$$

ahol

$T_{50}$  – az 50% martenzittartalomhoz tartozó lehülési idő,  
 $T_m$  – a 100% martenzittartalomhoz tartozó lehülési idő,  
 $T_b$  – a 0% martenzittartalomhoz tartozó lehülési idő,  
 $CE_H$  – a Harden-féle karbonegyenérték,  
 $CE_{III}$  – a varratfém szilárdságának becsléshez tartozó, Yurioka-féle karbonegyenérték.

Fontos megjegyezni, hogy ez csak közelítésre alkalmas, mivel a  $CE_H$  csak 0,3% széntartalomig értelmezhető, e fölött az összefüggés a karbon-egyenérték és a széntartalom között nem lineáris. Ezt az összefüggést alkalmazva az 1.2741 anyaghoz tartozó kritikus lehülési idő 4–226 perc az összetételről függően [7]. Ez a nagy intervallum jól mutatja a számítás pontosságának viszonylagosságát. Más közelítőmódszerek, ahol az 1.2741 szénegyenértéke kívül esett az értelmezési tartományon, hasonló eredményekre vezetnek [8, 9].

#### 1.3.2. Béres módszere erősen ötvözött acélokhoz

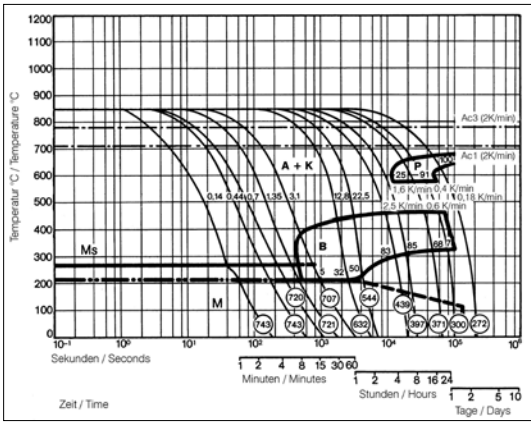
Leghelyesebben akkor járunk el, ha az alapanyag CCT-diagramjából indulunk ki, és a hegesztést az úgynevezett bénites előmelegítéssel végezzük. Ilyenkor az előmelegítés hőmérséklete a bénites átalakulási görbe orrponjtja, az előmelegítést pedig lassan végezzük.

Ez alapján (1. ábra) az előmelegítés hőmérsékletét 400–450 °C-ban határoztam meg, és a próbatesteket kemencével együtt hűtöttem [10].

#### 1.4. A felhasznált hegesztőanyagok

A kísérletekhez négyféle hegesztőanyagot használtam, ezek összetételükben és feldolgozási tulajdonságaikban is jelentősen eltértek. Minden





1. ábra. Az 1.2741 szerszámacél CCT-diagramjának releváns része (függőleges tengely: hőmérséklet (°C), vízszintes tengely: idő (s) [10])

huzal portöltetű volt, és a robotosított hegesztési folyamatoknál megszokotthoz képest (1 mm) nagyobb átmérőjű, a főbb adatokat az 1. táblázat tartalmazza.

A hegesztési technológia kidolgozása során a gyártók által megadott technológiai ablak ellenőrzésére és felülvizsgálatára is szükség volt.

1. táblázat. A hegesztőanyagok összesítése

Huzal	Alapfém	Fő ötvözők	Átmérő
H1	Fe	Cr-Mo-C	1,2 mm
H2	Fe	Mo-Cr-C	1,2 mm
H3	Fe	Nb-Cr-C	1,6 mm
H4	Ni	Cr-Mo-W	1,6 mm

## 2. A hegesztési kísérletek

A huzalok vizsgálatához 100×100×250 mm befoglalóméretű próbatestekre két rétegben 6 mm vastag réteget hegesztettem fel Yaskawa EA1400-as robottal, M21-es gázkeverékkel. Közben vizsgáltam a feldolgozhatóságot, és később ezekből a próbatestekből munkáltam ki mintákat a metallográfiai vizsgálatokhoz.

### 2.1. A feldolgozhatóság értékelése

A feldolgozhatóság értékelése során több olyan szempont merül fel, melyeket nehéz kvantitatív módon értékelni. Az általam fontosnak tartott sajátosságokat pontozásos módszerrel értékeltem és táblázatos formában összegeztem. A pontozás során a hegesztőanyagok egyes tulajdonságait egytől négyig pontoztam, ahol az 1 a legrosszabb, a 4 a legjobb pontszám. A vizsgált tulajdonságok és azok értékelésének szempontjai az alábbiak, a kiértékelést a 2. táblázat összegzi:

- Ívstabilitás (I.): sikerült-e a gyártó által megadott áramerősség-feszültség ablakban olyan beállításokat találni, amelyek mellett stabil, jól fókuszált, irányítható ív jön létre?

- Fröcskölés (II.): a legstabilabb ív mellett kialakuló fröcskölés mértéke és a szétrepülő cseppek mérete. A minél kevesebb és minél kisebb méretű fröcskölés a kedvező.

- Varratalak (III.): mekkora a varratdudor peremszöge, fennáll-e folytonossági hiány kialakulásának veszélye a következő sor hegesztése során, mennyire lesz egyenletes vagy hullámos a felület hegesztés után? A széles és kis peremszögű varratok a kívánatosak.

- Termelékenység (IV.): a próbatest hegesztésével eltöltött idő. A minél termelékenyebb eljárást tekintem kedvezőbbnek.

- Salak (V.): a hegesztést követően kialakuló salak mennyisége és tapadása a felülethez. A minél könnyebben eltávolítható, vékony, könnyen feloldozható salakréteg kedvezőbb.

- Füst (VI.): a kevesebb füst- és koromképződéssel lehegeszthető huzal kedvezőbb.

2. táblázat. A hegesztőanyagok összehasonlítása

Jel	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	Σ
H1	2	3	2	2	3	3	15
H2	1	2	3	3	4	3	15
H3	4	4	4	4	1	1	18
H4	4	3	4	3	4	2	20

## 2.2. A technológia megfelelésének igazolása

A próbatesteket először vizuális vizsgálatnak (VT) vetettem alá, majd a lehűlést követően, amennyiben lehetséges volt, folyadékbehatolós vizsgálatnak is (PT). Azokat a próbatesteket, melyek nem feleltek meg ezeken a vizsgálatokon, már nem vettem alá a mikro- és makroszerkezeti, valamint a keménységvizsgálatnak (HV). Az eredményeket a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat. A kötések vizsgálatának összesítése; OK = megfelelő, NO = nem megfelelő, – = nem vizsgált (a próbatest jele azonos a készítéséhez használt huzaléval)

Jel	VT	PT	Mikro	Makro	HV	
H1	OK	OK	OK	OK	OK	OK
H2	NO	OK	–	–	–	NO
H3	–	–	OK	NO	OK	OK
H4	NO	NO	–	–	–	NO

A H2 hegesztőanyag esetében jelentős áramerőségingadozás lépett fel a hegesztés során, ami nagyméretű összeolvadási hiányokat okozott. Az ettől nem érintett varratrészek repedésmentesek voltak.

A 4. hegesztőanyag esetében a beállítások során még megfelelően működő huzal jelentős porozitású varratfémet produkált. A H3 hegesztőanyag esetében a salakréteg olyan vastag és jól tapadó volt, hogy eltávolítása nem volt lehetséges, továbbá a rétegek között nagyméretű salakzárványok maradtak vissza. A H1 huzal mikroszerkezeti felvételein egyenletes eloszlású mikrosalakzárványok figyelhetők meg; ezek a működést nem befolyásolják jelentősen, méretük és mértékük elfogadható.

### 3. A robotcella kialakítása

A lehetséges robotcella-változatok kialakítása során az alábbi szempontokat kellett figyelembe venni:

- Elérés: a robotnak úgy kell elérni a munkadarabot, hogy hegesztés közben ne alakuljon ki szinguláris karhelyzet.
- Hozzáférés: a robot és a hegesztőpisztoly közösen határozza meg. A belső kábelezés kialakítás előnyös.
- Hőterhelés: a nagy előmelegítési hőmérséklet miatt kulcsfontosságú kérdés. A melegnek jobban ellenálló vagy kisebb hőterhelésű kialakítást kell előnyben részesíteni.

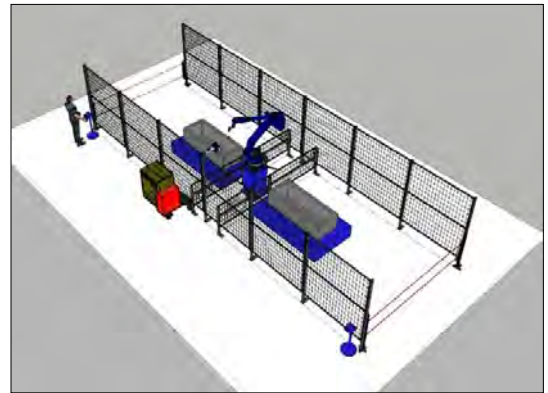
Minden robotcellát két munkahelyesnek terveztem. Ez lehetővé teszi, hogy a darabok előkészítését a hegesztés helyén végezzék.

#### 3.1. Nagy karkinyúlású robot

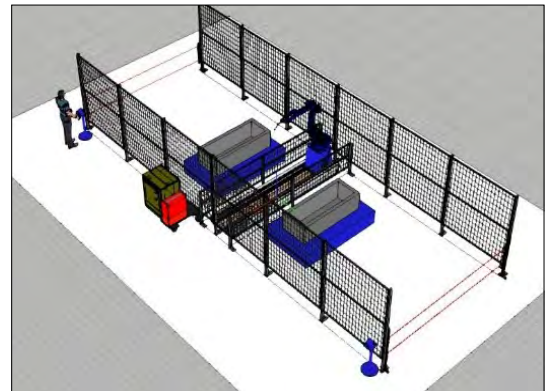
A robotkar jelentős része a hegesztés helyétől távol helyezkedik el, ezért a munkadarab sugárzó hője kevésbé terheli, illetve nagyméretű szerzőmókat is elér (2. ábra). Ennek a kialakításnak hátránya, hogy a robotkar egy általános hegesztőrobothoz képest kevésbé univerzális, így ha a már meglévő feladat megszűnik, nehezebb újat találni. A külső kábelezésű hegesztőpisztoly nem biztosít olyan jó hozzáférést, mint az integrált kábelezésű robotokra szerelhetők.

#### 3.2. Utazópályára szerelt robot

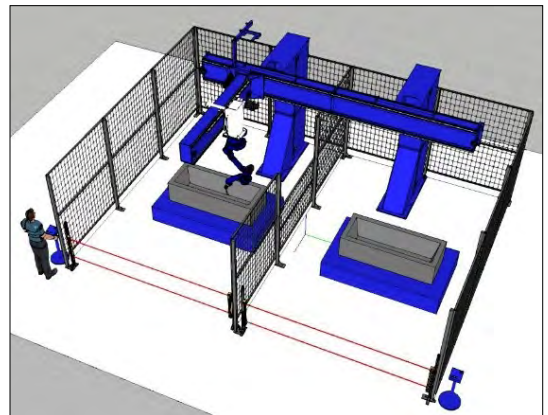
Az YR MH2010 egy hosszabbított munkaterű, belső kábelezésű hegesztőrobot, bármilyen hegesztési feladat ellátására megfelelő (3. ábra). TSL 1000 utazópályával a robot munkaterete nagyméretben növelhető, az elérés nemcsak mennyiségében, de minőségében is javul, mert könnyebben elkerülhetők a szinguláris karhelyzetek.



2. ábra. Robotcella nagy kinyúlású robotkarral



3. ábra. Robotcella utazópályás robottal



4. ábra. Kéttengelyes, felső utazópályára szerelt robotkar

#### 3.3. Felsőpályás robot

A kéttengelyes, felső utazópályára szerelt Gantry-robotkar legnagyobb előnye, hogy munkaterülete nagyon nagy, ennek köszönhetően egy nagyméretű kovácsszerszám minden pontját ugyanazal a magabiztossággal éri el (4. ábra).

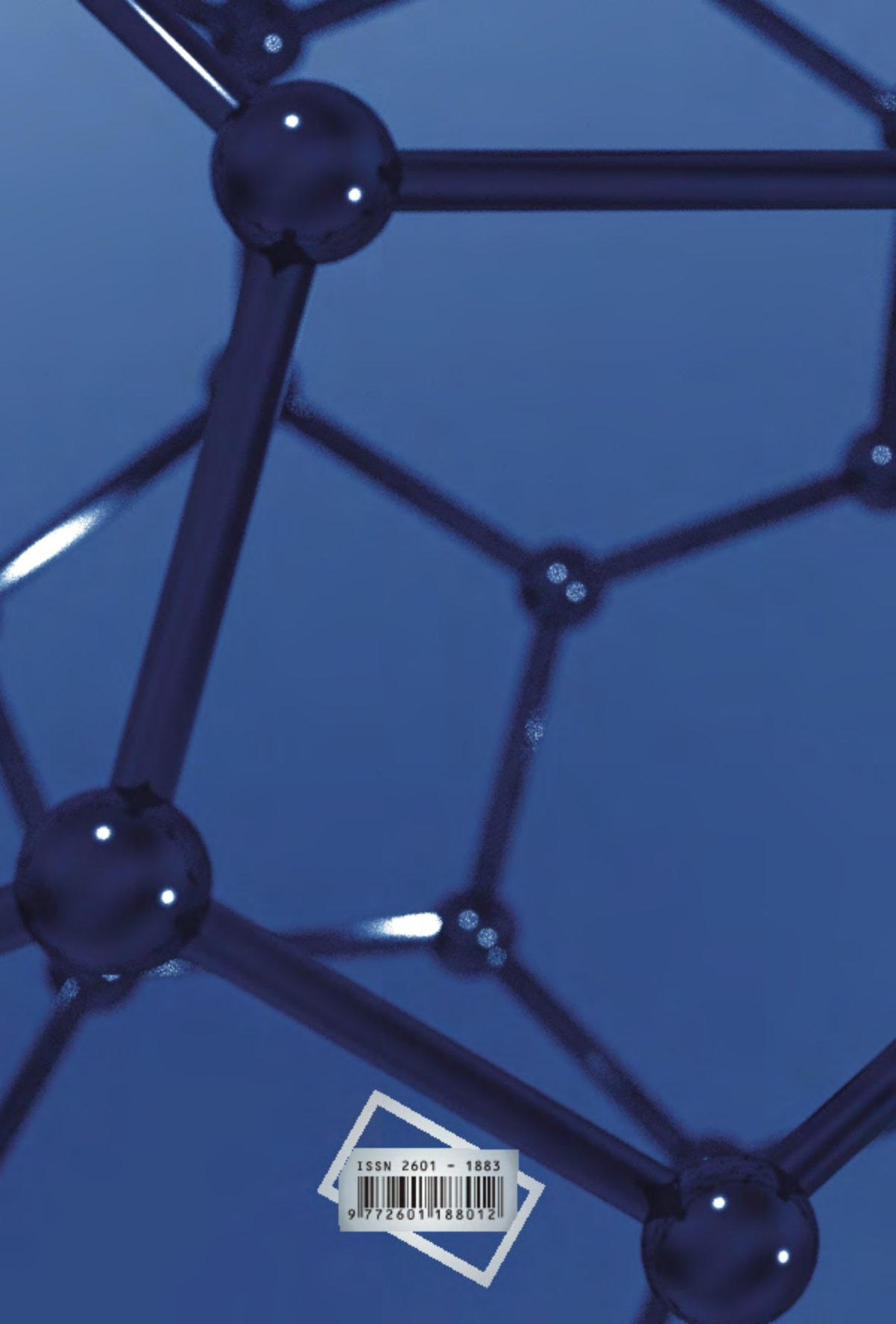
#### 4. Összefoglalás

Az optimális hegesztőanyagot csak üzemi kopatóvizsgálatok segítségével választhatjuk ki. Erre a H1 hegesztőanyag megkötések nélkül bocsátható. A H3 hegesztőanyag kiváló feldolgozhatósága ellenére valószínűleg nem alkalmas a feladatra, ha a salakzárványok kialakulását nem sikerül további kísérletek során megnyugtatóan megszüntetni. A H2 huzal során tapasztalt előtolási problémák recés görgővel és nagyobb szorítóerővel megszüntethetők, további vizsgálatok javasoltak. A H4 huzalból új adagot beszerezve a vizsgálatokat érdemes megismételni.

A robotcella kialakítását a megrendelővel közösen kell meghatározni, mivel az üzemi adottságok és az anyagi lehetőségek felülírhatják az egyéb megfontolásokat. Robotprogramozás és elérés szempontjából a felső utazópályás cella a legjobb kialakítás, de a robot hőterhelése is ebben az esetben a legnagyobb; ezért vizsgálni kell, hogy a berendezés milyen kiegészítő védelem mellett képes ezt elviselni.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Béres L.: *Javító- és felrakóhegesztések*. In: Hegesztési zsebkönyv. (Szerk.: Gáti J.). Cokom Mérnökiroda Kft., Miskolc, 2003. 539–557.
- [2] Uzonyi S., Asztalos L., Farkas A., Dobránszky J.: *Additív hegesztéses gyártás jelene és jövője*. Hegesztéstechnika, 28. (2017) 89–92.
- [3] Ding D. et al.: *Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 81/1–4. (2015) 465–481.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
- [4] Wang F. et al.: *Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V*. Metallurgical and Materials Transactions A, 44/2. (2013) 968–977.  
<https://doi.org/10.1007/s11661-012-1444-6>
- [5] Ding D. et al.: *A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 31. (2015) 101–110.  
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.08.008>
- [6] Ali Y. et al.: *Wire arc additive manufacturing of hot work tool steel with CMT process*. Journal of Materials Processing Technology, 269. (2019) 109–116.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.034>
- [7] Kasuya T., Yurioka N.: *Determination of Necessary Preheat Temperature to Avoid Cold Cracking under Varying Ambient Temperature*. ISIJ International, 35/10. (1995) 1183–1189.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.1183>
- [8] Bauer F., Béres L., Buray Z., Szita L.: *A legfeljebb közepesen ötvözött edzhető acélok*. In: A hegesztés anyagismerete és a hegesztéstechnológia alapjai. Budapesti Műszaki Egyetem Mérnöki Továbbképző Intézet, Budapest, 1995. 54–64.
- [9] Béres L.: *Determination of an optimized Interpass Temperature for the Welding of Martensitic Stainless Steels*. The International Journal for the Joining of Materials, 9/1. (1997) 16–19.
- [10] Bauer F., Béres L., Buray Z., Szita L.: *Erősen ötvözött edzhető acélok előmelegítési hőmérsékletének meghatározása*. In: A hegesztés anyagismerete és a hegesztéstechnológia alapjai. Budapesti Műszaki Egyetem Mérnöki Továbbképző Intézet, Budapest, 1995. 64–68.



ISSN 2601 - 1883



9 772601 188012