

# ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA

Anyagtudományi Közlemények

4. évfolyam, 2021. 2. szám



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET  
Kolozsvár  
2021

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



**Főszerkesztő / Editor-in-Chief:** Bitay Enikő

**Nemzetközi Tanácsadó testület / International Editorial Advisory Board:**

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

**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

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

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

**Szerkesztőségi titkár / Editorial secretary:** Kisfaludi-Bak Zsombor

**Borítótér / Cover:** Kőnczey Elemér

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

**Copyright** © a szerzők / the authors, EME/ TMS 2020

ISSN 2601-1883, ISSN-L 2601-1883

DOI: [10.33923/amt-2021-02](https://doi.org/10.33923/amt-2021-02)

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

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

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

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

## Tartalom / Content

---

BAGYINSZKI Gyula, BITAY Enikő .....	65
<i>Az ívhegesztés gépesítettségi szintjeinek jellemzői</i>	
<i>Characteristics of the Levels of Mechanisation in Arc Welding</i>	
BÍRÓ Tamás, RENKÓ József Bálint .....	71
<i>Ponthegeztő berendezés gyártása háztartási elektronikai hulladékból</i>	
<i>Manufacture of a Home-Made Spot Welding Machine from Household Electronic Waste</i>	
BIRTON Botond-Antal, GERGELY Attila .....	75
<i>Műanyag-vákuumformázó gép tervezése és kivitelezése</i>	
<i>Design and Implementation of a Vacuum Forming Machine</i>	
BORHY Levente, FARKAS Péter Zoltán, VOLOM András .....	79
<i>Üvegszál-erősítésű kompozit fogtömések vizsgálata</i>	
<i>Examination of Glass-Fibre Reinforced Composite Dental Fillings</i>	
BUKOR Csongor, KÁROLY Dóra, CSIPPA Benjamin .....	83
<i>Befogókészülék fejlesztése koponyaűri áramlásirányító sztentek húzóvizsgálatához</i>	
<i>Development of a Clamping Device for Tensile Testing of Intracranial Flow Diverter Stents</i>	
GERE Dániel, PÖLÖSKEI Kornél.....	87
<i>Politejsav fóliák pneumatikus alakíthatósági vizsgálatának fejlesztése</i>	
<i>Development of Pneumatic Deformability Test of Polylactic Acid Films</i>	
KINCSES Domonkos Balázs, KEMÉNY Alexandra, LEVELES Borbála, KÁROLY Dóra .....	93
<i>Csővel körülölelt, fémhabalapú kompozitok gyártása, hőkezelése és vizsgálata</i>	
<i>Manufacturing, Heat Treatment and Investigation of Foam-Filled Tubes</i>	
KUN Krisztián .....	97
<i>Kísérleti fröccsöntő szerszám tervezése mikrostrukturált formaadó felületek vizsgálatához</i>	
<i>Design of an Experimental Injection Moulding Tool for Testing Microstructured Cavity Surfaces</i>	

PIRITYI Dávid Zoltán, PÖLÖSKEI Kornél..... **103**

*Grafit- és grafénerősítésű sztírol-butadién kaucsuk fejlesztése*

*Development of Graphite- and Graphene Reinforced Styrene-Butadiene Rubber*

SCHRAMKÓ Márton, KOVÁCS Tünde ..... **109**

*Réz és ausztenites korrózióálló acélvegyes kötésének kialakítása ultrahangos hegesztéssel*

*Producing a Dissimilar Joint of Copper to Austenitic Stainless Steel by Ultrasonic Welding*

## Az ívhegesztés gépesítettségi szintjeinek jellemzői

# Characteristics of the Levels of Mechanisation in Arc Welding

Bagyinszki Gyula,<sup>1</sup> Bitay Enikő<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, [bagyinszki.gyula@bgk.uni-obuda.hu](mailto:bagyinszki.gyula@bgk.uni-obuda.hu)

<sup>2</sup> Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Marosvásárhely, Románia, [ebitay@ms.sapientia.ro](mailto:ebitay@ms.sapientia.ro)

---

### Abstract

Improvement of quality, reduction of the subjective possibilities of faults may be facilitated with the help of the technically rational and economically justifiable mechanisation of productive serial production as well as the use of the wide range of hardware and software IT possibilities. Mechanisation is usually understood as the mechanisation of technological operations that may otherwise be performed by manual operations (human movements and effort). Mechanisation is therefore the substitution, in whole or in part, of manual labour with the help of specialised equipment and the mechanical operation of the various movements. The present article examines the particular features of mechanisation in the field of outstandingly high significance in industrial applications, i.e. arc welding, assisting the forms of training applied in the specialty area..

**Keywords:** *arc welding, automation, robot.*

### Összefoglalás

A minőség javítása, a szubjektív hibalehetőségek szűkítése, a termelékeny sorozatgyártás műszakilag észszerű, de gazdaságilag is megalapozott gépesítéssel, illetve az informatika hardveres és szoftveres lehetőségeinek széles körű kihasználásával segíthető. Gépesítés (gépesítettség) fogalma alatt általában azon technológiai műveletek mechanizálása értendő, amelyek egyébként manuálisan (emberi mozgásokkal és erő kifejtéssel) is elvégezhetők lennének. Tehát a gépesítés a kézi munka részbeni vagy teljes kiváltása készülékezéssel, a mozgások gépi működtetésével. Jelen cikk az ipari alkalmazások szempontjából kiemelkedően fontos ívhegesztés esetében vizsgálja a gépesítettség sajátosságait, segítve a szakterület képzési formáit.

**Kulcsszavak:** *ívhegesztés, automatizálás, robot.*

---

## 1. Bevezetés

A hegesztési munkák területén a legnagyobb arányban alkalmazott ívhegesztés gépesítettségi szintjeit a kötészialakító, ill. a pozicionáló mozgások megvalósítási módja alapján lehet megadni (1. ábra) [1]. A táblázatos ábrában feltüntetett célgép és robot egyaránt önműködő, azaz saját hajtásrendszerű, a hegesztőfej megfelelő pontosságú beállítására, ill. mozgatására alkalmas manipulátor. Míg a robot adott munkatartományon belül több térbeli irányban és mozgáspályán

szabadon, azaz szoftveresen (újra)programozható (programvezérlésű), addig a célgép kötött mozgáspályás, ill. mozgásirányú, „hardveresen programozható”, azaz átszereléssel vagy átépítéssel tehető korlátozottan alkalmassá más feladat elvégzésére.

A példaként szerepeltetett számok az érintett hegesztési eljárások MSZ EN ISO 4063 szabvány szerinti kódjelei, melyekben

– az első tag a hőforrás (jelen esetben az ív),

Kötés kialakító mozgások		Kötés pozicionáló mozgások	GÉPESÍTTETTSÉGI SZINT		ELJÁRÁS GÉPESÍTÉSI PÉLDA		
Hozanyag-adagolás	Hegesztőfej-vezetés	Munkadarab-adagolás					
Szakaszosan vagy folyamatosan	Lengetéssel vagy anélkül	Készülékkel vagy anélkül					
Kézi	Kézi	Kézi	Kézi		111		141 151 152
Gépi	Kézi	Kézi	Részben gépesített		114		
Gépi	Gépi	Kézi	Gépesített	Célgépes	121	131 135 136 137	
				Robotos	122 123		
Gépi	Gépi	Gépi	automatizált	Célgépes	124	125	
				Robotos	125		

1. ábra. Ívhegesztés gépesítettségi szintjei

- a második tag az ömledékvédelem (önvédő: bevonatos, porbeles, fedett ívű; védőgáz), ill. az elektróda-„viselkedés” (leolvadó, nem leolvadó),
- a harmadik tag az eljárásváltozatok további megkülönböztető jelölésére szolgál. A lefelé nyitott számmezők többféle gépesítettségi szint lehetőségére utalnak. Pl. az igen széles körben alkalmazott 135-ös számjelű huzalelektródás aktív védőgáz ívhegesztés esetében a huzalelőtölés (hozanyag-adagolás) eleve gépi úton valósul meg. A kézi hegesztőfej (hegesztőpisztoly) mozgatáson kívül célgépes vagy robotos is lehetséges, kézi vagy gépi kiszolgálás (munkadarab-adagolás) mellett.

A hegesztés gyakorlatában – az 1. ábra alapján – megkülönböztetünk:

- kézi hegesztést, amelynél mind a hegesztési mozgások végrehajtása, mind a munkadarab adagolása emberi erővel történik. A műveleteket a hegesztő végzi, ellenőrzi és irányítja;
- részben gépesített hegesztést, amelynél a hegesztési mozgások végrehajtása részben, a munkadarab adagolása teljesen emberi erővel történik;
- gépesített hegesztést, amelynél a hegesztési mozgások végrehajtása gépi úton történik, a munkadarab adagolását kézzel végzik;
- automatizált hegesztést, amelynél mind a hegesztési mozgások végrehajtása, mind a munkadarab adagolása önműködően, gépesítve történik, közvetlen emberi beavatkozásra gyakorlatilag nincs szükség.

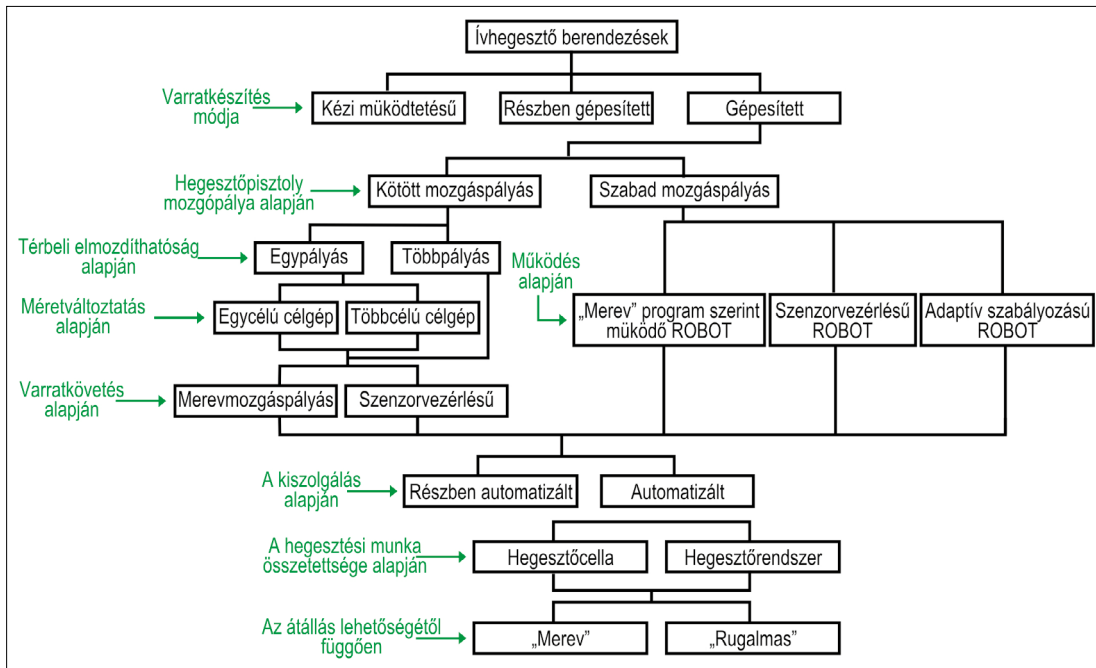
## 2. Robotok és célgépek

Tehát a gépesítettségi szint növelése a gépi mozgások számának növelésével érhető el, mellyel egy időben csökken az emberi beavatkozás (a human irányítás) mértéke. A célgépes és a robotos hegesztés a gépesített vagy az automatizált hegesztés kategóriájába sorolható, a munkadarab adagolási módjától függően. A hegesztőrobotok és célgépek néhány rendszerező szempontját a 2. ábra szemlélteti.

A gépesíttség valamilyen szintjén álló ívhegesztő berendezés négy alapvető szempont szerint minősíthető, melyekkel érzékeltethetők az alkalmazhatóságban és a fejlettségi szintben rejlő különbségek (3. ábra) [2]. A szabadági fokok száma az egymástól függetlenül vezérelhető mozgástengelyek, ill. azok mozgatóegységei száma. Ehhez 2 mozgásfajta (T = translációs vagy haladó, R = rotációs vagy forgó), ill. 3 koordinátatengely (amely mentén a transláció vagy amely körül a rotáció megvalósul) választható. Az ívhegesztő robotok karrendszereiről, vezérléséről és szenzorjairól a [3]-ban adtunk rendszerező áttekintést.

## 3. Gépesítettségi szintek jellemzői

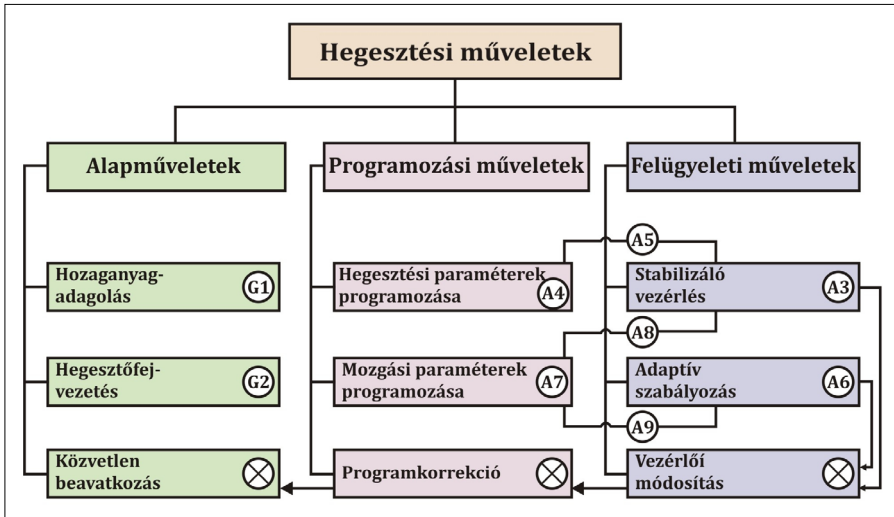
A gépesítettségi szintet jól jellemzi azon műveletek száma, amelyek gépesítésének technikai feltételei megoldottak az adott berendezés kapcsán. E műveletek felosztási sémáját mutatja a 4. ábra, feltüntetve a vonatkozó gépesítettségi szinteket is, melyek egymásra épülése és kapcsolódási pontjai az 5. ábrán követhetők nyomon [4, 5].



2. ábra. Hegesztőrobotok és célgépek rendszerező szempontjai

Alkalmazási kör			Varratkészítési mód			Kiszolgálás			Szabadsági fokok		
Uni- ver- zális	Célgé- pes	Ve- gyes	Kézi	Rész- ben gépe- sített	Gépe- sített	Kézi	Rész- ben auto- mati- zált	Auto- mati- zált	Száma	Jellege	(Koordináta) rendszere
Többféle kialakítású, többféle méretű munkadarabhoz	Meghatározott kialakítású, meghatározott méretű munkadarabhoz	Meghatározott kialakítású, többféle méretű munkadarabhoz	Kézi hozaganyag-adagolás, kézi hegesztőfej-vezetés	Gépi hozaganyag-adagolás, kézi hegesztőfej-vezetés	Gépi hozaganyag-adagolás, gépi hegesztőfej-vezetés	Kézi munkadarab-adagolás, kézi munkadarab-pozicionálás	Kézi munkadarab-adagolás, gépi munkadarab-pozicionálás	Gépi munkadarab-adagolás, gépi munkadarab-pozicionálás	1	1R 1T	1 tengelyes forgató vagy előtoló
									2	2R 1R+1T 2T	2 tengelyes (síkbeli)
									3	3R 2R+1T 1R+2T 3T	3 vagy többtengelyes (térbeli)
									4	4R 3R+1T 2R+2T 1R+3T	Humanoid Gömbi SCARA Henger Derékszögű Tricept (3 szabadsági fok felett tájoló mozgásokkal)
									5	5R 4R+1T 3R+2T 2R+3T	
									6	6R 5R+1T 4R+2T 3R+3T	
									7	7R 6R+1T 5R+2T 4R+3T	

3. ábra. Az ívhegesztő berendezések jellemzői



4. ábra. A gépesítéssel összefüggő hegesztési műveletek felosztása

Alcsoport		Alapműveletek		Programműveletek		Felügyeleti műveletek		
Részcsoport		Hozaganyag-adagolás	Hegesztőfej-vezetés	Hegesztési paraméterek programja	Mozgási paraméterek programja	Stabilizáló vezérlés	Adaptív szabályozás (szenzorvezérlés)	
Típus	Szint							
Gépesítés	1	G1						
	2		G2					
Automatizálás	3			A3				
	4			A4				
	5			A5				
	6			A6				
	7				A7			
	8					A8		
	9						A9	
Megnevezés		Részen gépesített	Gépesített	Általános célú	Hegesztési program (célgépes)	Első generációs	Második generációs	Harmadik generációs
Osztály		1.		2.	3.	4.		
Típus		Gépesítés		Automatizálás				

5. ábra. A gépesítettségi szintek és kapcsolataik

Az egyes szinteket megvalósító berendezések, illetve legfontosabb jellemzőik a következőkben foglalhatók össze:

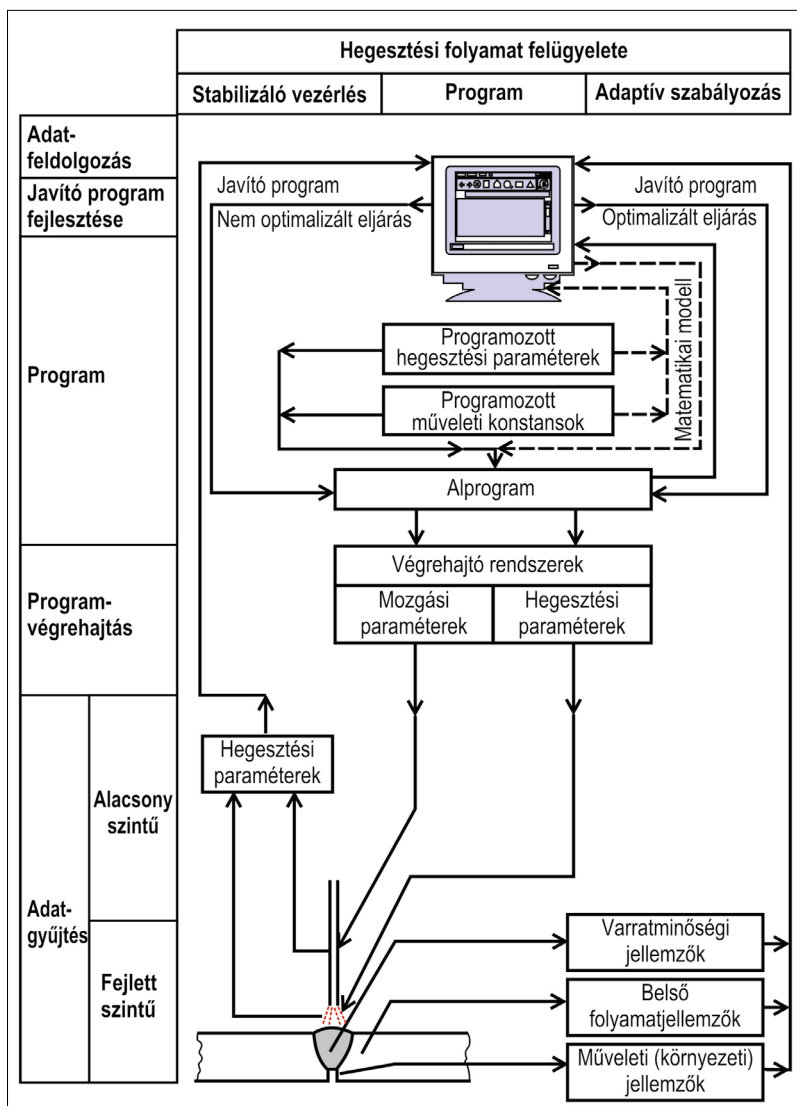
Az ábrán nem szerepeltetett nulladik vagy vonatkoztatási alapszintnek (G0) a bevont elektródás kézi ívhegesztés (111) tekintendő, és ehhez képest

mérhető a többi szint gépesítettsége. A nulladik és az első szint közé „besorolható” még a (G0,5) gravitációs ívhegesztés (112), amely ugyan nem alkalmaz gépi mozgást, de a gravitációs erőhatást alkalmazó egyszerű eszköz révén – kézi beállítás után – a bevonatos elektróda „önműködően” olvad le.



- (G1) gépi hozaganyag-adagolású (huzalelőtólású), részben gépesített védőgázos ívhegesztő (13, 14, 15) berendezések, nagy leolvadási teljesítménnyel és széles alkalmazási körrel. Már nem alkalmazzák, de létezett egy első és második szint közé besorolható (G1,5) bevont elektródás, gépesített ívhegesztés, melynél a gravitációs elvű elektróda-előtóláshoz gépi hegesztőfej (hegesztőegység) vezetés társult.
- (G2) mozgatóegységre szerelt hegesztőfejjel rendelkező gépesített fedett ívű (fedőporos) hegesztő (12) berendezések, előzetesen beállított paraméterekkel és igen nagy teljesítménnyel.

- (A3) ívszenzorral ellátott, ívstabilizáló vezérléssel működő, általános felhasználási célú berendezések, amelyek – a fő hegesztési paraméterekben beállt változásokat korrigálva – biztosítják a hegesztés folyamatosságát, de a változó hegesztési körülményeket nem veszik figyelembe.
- (A4) kötött mozgáspálya mentén haladó, az egyes pályaszakaszokhoz programozott paramétereket hozzárendelő egycélú célgépek, amelyek lehetnek részben vagy teljesen gépi kiszolgálásúak, viszont nincsenek felszerelve szenzorokkal.



6. ábra. Hegesztési folyamatfelügyeleti séma

- (A5) ívstabilizáló vezérléssel ellátott, programozott paraméterekkel dolgozó, változó pozíciójú mozgáspályákhoz alkalmazható egy- vagy többfejes, többcélú (pl. cső- és tartály-) hegesztő célgépek.
- (A6) programozott paraméterekkel dolgozó, szenzorvezérlésű (varratkereső és/vagy varratkövető szenzoros), többcélú célgépek, amelyek változó körülmények között is biztosítják az állandó varratminőséget. Természetesen ezek a jellemzők az adaptivitás fogalmát csak részben merítik ki. Ez a szint jelenti a célgépek egyfajta határát, ugyanis a következő szint már „minőségi ugrást” jelent az ipari robotok világába.
- (A7) első generációs robotok, amelyek az aktuálisan végrehajtandó program szerinti mozgás ismétlésére képesek. Mozgásuk determinisztikus, mozgáspályájuk olyan értelemben „merev”, hogy független a munkavégzés helyén bekövetkező változásoktól. Ugyanis nem rendelkeznek olyan eszközökkel, amelyekkel érzékelni és módosítani tudnák a mozgás-programjukat. Alkalmazásuk alapvető követelménye a munkadarabok pontos előzetes megmunkálása, tájolása és illesztése.
- (A8) második generációs robotok, amelyek a munkavégzés helyén bekövetkező lényeges változásokhoz képesek alkalmazkodni. A mindenkori mozgást a működésbe hozott szenzorok jelzései alapján, az adott cél elérésére vonatkozó irányítási algoritmus szerint vezérlik. A nagy mennyiségű információ gyors feldolgozására nagy teljesítményű hardvert és szenzoros kommunikációra alkalmas szoftvert használnak.
- (A9) harmadik generációs robotok, amelyek érzékelőkkel a környezet többféle jellemzőjének észlelésére és a változó környezethez való alkalmazkodásra, adaptivitásra képesek. Alak- és szituációfelismerésre és annak alapján önálló döntésekre is képesek mesterséges intelligenciájuk alapján. Egy ilyen hegesztési folyamatfelügyelő rendszer felépítési vázlata [5] látható a 6. ábrán.

Az adaptív szabályozás egyrészt közelít az optimális viszonyokhoz változó körülmények esetén, másrészt egyre nagyobb mértékben kiküszöböli a szubjektív hibákat a hegesztési folyamat irányításából. Ehhez természetesen minél több technológiai és környezeti jellemzőt mérő szenzor szükséges, amelyek pontossága és érzékenysége nagymértékben befolyásolja a mért és a folyamat irányítására – visszacsatolás révén – felhasznált értékek jóságát. Ugyancsak nagy jelentősége van a folyamatokat leíró matematikai modellek valóságközeliségének az optimalizáló algoritmusok szempontjából.

#### 4. Következtetés

A gépesítés eszköztárából – alkalmazási jellemzői miatt – kitűnnek a célgépes manipulátorok, illetve a perifériákkal együttműködő, rugalmasan programozható ipari robotok. Alkalmazásukkal a termelékenység növekszik, a gyártás ciklusideje csökken, javul a minőség, a reprodukálhatóság, nő a termelési rendszer rugalmassága, csökkenteni lehet a monoton és nehéz fizikai munkát, egészségre fokozottan ártalmas helyeken segítségükkel az emberi tevékenység kiváltható. A gépesítettségi szintjük „mértéke” műszaki, gazdasági, szervezési szempontok szerint választható meg.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Bagyinszki Gy., Bitay E.: *Hegesztéstechnika I. - Eljárások és gépesítés*. Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2010.  
<https://doi.org/10.36242/mtf-08>
- [2] Bauer F.: *A hegesztés gépesítése*. Hegesztéstechnológia 4., 1986.
- [3] Bagyinszki Gy., Bitay E.: *Ívhegesztő robot alkalmazástechnikai jellemzői*. XV. Fialat Műszakiak Tudományos Ülésszaka, XV. (2010) 9–16.  
<https://doi.org/10.36243/fmtu-2010.04>
- [4] Malin V.: *Designer's Guide to Effective Welding Automation – Part I: Analysis of Welding Operation as Objects for Automation*. Welding Journal, LXV. 17., 1985.
- [5] Malin V.: *A new approach to the definition and classification of welding automation*. Second International Conference – Developments in Automated and Robotic Welding, The Welding Institute, London, 1987. november 17-19.

# Ponthelesztő berendezés gyártása háztartási elektronikai hulladékból

## Manufacture of a Home-Made Spot Welding Machine from Household Electronic Waste

Bíró Tamás,<sup>1</sup> Renkó József Bálint<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia Tanszék  
 Budapest, Magyarország, [biro.tamas@edu.bme.hu](mailto:biro.tamas@edu.bme.hu)

<sup>2</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia Tanszék  
 Budapest, Magyarország, [renko.jozsef@edu.bme.hu](mailto:renko.jozsef@edu.bme.hu)

---

### Abstract

Nowadays, spot-welding technologies are being used on a very wide range of applications. Spot-welded joints can be found in many pieces of equipment, such as toasters, computers, telephone batteries, or even in various pre-manufactured car elements. Given the prevalence of the technology, there may be a legitimate need for a machine that can be used at home for simple spot-welding operations. Such a device could be produced more cost-effectively than those currently available on the market, while using household electronic waste. These could be produced for hobby purposes, thus creating an opportunity to recycle certain types of household electronic waste, thereby improving sustainability in an engineering approach.

**Keywords:** *resistance spot welding, battery, sustainability.*

### Összefoglalás

Napjainkban a ponthelesztési eljárás igen széles körű alkalmazásnak örvend. Ponthelesztett kötésekkel lehet találkozni a hétköznapi élet számos területén: a kenyérpíróban, a számítógép vagy a telefon akkumulátorán, de akár autópánci karosszériaelemeken is. Tekintettel az eljárás elterjedtségére, jogosan merülhet fel az igény a hobbi barkácműhelyben egy olyan ponthelesztő berendezés iránt, amely kis teljesítményű, de az egyszerű ponthelesztési műveletek elvégzésére alkalmas. Ilyen berendezések léteznek a piacon, ugyanakkor jelen cikk rávilágít arra, hogy költséghatékonyan, akár háztartási elektronikai hulladékok felhasználásával is előállítható a hobbicélokra jól használható ponthelesztő berendezés, lehetőséget teremtve ezzel bizonyos típusú háztartási elektronikai hulladékok újrahasznosítására, erősítve a fenntarthatóság érvényesülését is a mérnöki szemléletben.

**Kulcsszavak:** *ponthelesztés, akkumulátor, fenntarthatóság.*

---

## 1. Bevezetés

A folyamatosan növekvő fogyasztói igény gazdaságos kielégítése komoly kihívást jelent az ipar számára. A rendelkezésre álló erőforrások korlátozottsága arra ösztönzi a mérnököket, hogy új, fenntartható folyamatokat hozzanak létre, illetve a meglévőket továbbfejlesszék a kor elvárásainak

megfelelően. A hegesztés is régi gyártási eljárásnak számít, ugyanakkor a 20. századtól kezdve folyamatos fejlődésen ment keresztül [1–3]. Napjainkra nemcsak ipari alkalmazásokban, hanem a legtöbb barkácműhelyben is találkozhatunk ívhegesztő berendezésekkel. Ugyanakkor ez nem mondható el az ellenállás-hegesztés kapcsán, amelynek oka többek között e berendezések

ára [4]. E cikk tárgyának, egy hobbi ponthegező berendezés elkészítésének ötletét egy gyakorlati problémára keresett megoldás hívta életre. Egy fűrógép meghibásodott akkumulátorának javítását akartuk elvégezni, ami tipikusan ponthegeztést igénylő művelet. Az alapötletet egy blogbejegyzés [5] adta, amelyben egy mikrohullámú sütő transzformátorát használták fel hasonló célokra. Munkánk során ezt a koncepciót akartuk továbbfejleszteni egy olyan ponthegező tervezésével, gyártásával és gyakorlati tesztelésével, amely zömében újrahasznosított alkatrészekből épül fel, és később – egy termékfejlesztési folyamat részeként – egy hobbicélokra jól használható, piacképes termék születhet belőle.

## 2. Tervezés és gyártás

A konstrukció kialakításával kapcsolatos munka egy részletes követelményjegyzék felállításával kezdődött, amely már létező berendezések jellemzőit figyelembe véve készült, ahol pedig ilyen nem állt rendelkezésre, a tervezési szempontok önkényesen kerültek meghatározásra [6–8]. Ilyen követelmény például (a teljesség igénye nélkül) a berendezés 230 V-os hálózatról történő üzemeltethetősége, IP 33-as védettség, az egyszerű felépítés, a mobilitás és a környezetvédelmi szempontok érvényesülésének biztosítása, a hegesztési idő és a hegesztési áramerősség szabályozhatósága. Ezen túl megköveteltük a szerkezettől, hogy képes legyen 0,1–0,15 mm-es lemezek közötti átlapolt kötések kialakítására. A következőkben a fontosabb részegységek konstrukciós kialakítását és gyártását mutatjuk be.

### 2.1. A transzformátor kialakítása

A hegesztőgép legfontosabb és legköltségesebb eleme a transzformátor, amely biztosítja a művelethez szükséges kis feszültséget és nagy áramerősséget. Ezt egy meghibásodott mikrohullámú

sütőből nyertük ki, hiszen ezeknek a transzformátoroknak a jobb mágneses tulajdonságuk miatt nagyobb a teljesítménysűrűségük, mint a hagyományos, lemezes, szerelt társaiknak, így a hegesztéshez szükséges áram tömeg- és helytakarékos módon biztosított. A bontott transzformátorból az eredeti szekunder tekercsének eltávolítása után a lehető legnagyobb vezeték-keresztmetszettel dolgozva kétmenetes szekunder tekercset alakítottunk ki. Az új tekercseléssel ellátott transzformátor az **1. ábrán** látható.

### 2.2. Vezérlőegység

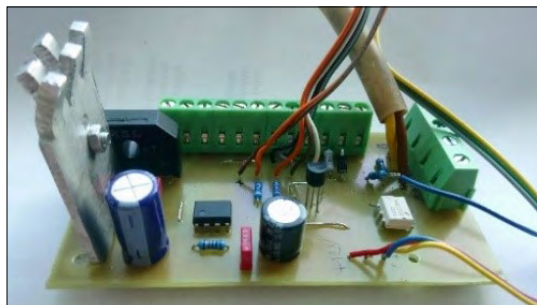
Mivel a berendezés elsősorban a hobbiigények kielégítésére, azon belül akkumulátorcellák csatlakozóinak ponthegeztésére készült, igen fontos a megfelelő hegesztési munkarend pontos betartása. Ehhez a hegesztőáram és a hegesztési idő állíthatóságát is biztosítani kellett [9, 10]. Ennek megvalósítására egy vezérlőáramkört terveztünk, amely egyszerű teljesítményelektronikai elemek felhasználásával készült. A hegesztés során alkalmazott áramerősség beállítása a fázishasítás elvén működik [11, 12], a hegesztési idő változtatása pedig egy időzítő integrált áramkör [13] révén valósul meg. A **2. ábrán** látható vezérlőpanel az áramkörti tervek nyáklapra laminálásával, illetve vegyi maratással készült, az alkatrészeket pedig a nyáklemez fúrása után lágyforrasztással építettük be.

### 2.3. Burkolati elemek és perifériák

A berendezés biztonságos és ergonomikus használatához szükség volt a megfelelő gépház és burkolati elemek mellett az elektród tartók és egy lábkapcsoló tervezésére is. A burkolathoz felhasznált lemezek szintén újrahasznosított elemei a gépnek, korábban egy hűtőszekrény borításaként funkcionáltak. A hegesztéshez szükséges elektródnyomás kézi erővel biztosított, és jelenleg csak egyoldali, kétpontos hegesztést tesz lehe-



**1. ábra.** Új szekunder tekercssel ellátott, egy mikrohullámú sütőből kiserelt transzformátor



**2. ábra.** A hegesztőáram és a hegesztési idő állíthatóságát megvalósító vezérlőegység

tővé, ugyanakkor megfelelő adapter tervezésével kétoldali ponthegeztésre is alkalmazható. Az elkészült ponthegeztő gép a **3. ábrán** látható.

### 3. Gyakorlati tesztelés és minősítés

A termékfejlesztés igen fontos mozzanata volt a gyártás után a berendezés tesztelése. A célokban megfogalmazott követelmények teljesítését ugyanis ellenőrizni kellett. Ponthegeztett kötések vizsgálatára több eljárás is létezik [14], amelyek közül nyíró-szakító vizsgálatot végeztünk a varratok minősítésére. A próbatesteket 0,1 mm, 0,2 mm és 0,3 mm vastagságú, S235JR anyagminőségű lemezek átlapoló kötésével alakítottuk ki. A hegesztési idő rendre 0,5 s, 1 s és 3 s volt, áramerősségnek pedig a berendezés által biztosított maximális érték lett beállítva. Az így meghatározott lemezvastagság-hegesztési idő párokból a **4. ábrán** látható módon 10-10 próbahegesztést végeztünk. A pontvarratok elhelyezésénél figyelni kellett arra, hogy a nemkívánatos csavaró igénybevétel esetleges megjelenését és annak hatását minimalizálni tudjuk [9].

A minősítés kvalitatív módon, a próbatestek szakadási helyének makroszkópos vizsgálatával

történt. A szakítást 2 mm/min sebességgel végeztük. Ezek alapján a berendezés – a hibás próbatesteket leszámítva (ahol a varratlencse a lemezpár teljes keresztmetszetében megolvadt) – a 0,1 mm-es lemezeket 88%-ban, a 0,2 mm-es lemezeket 77%-ban, a 0,3 mm-es lemezeket 0%-ban hegesztette össze sikeresen. A hegesztés megfelelőségének feltétele az volt, hogy a varratok a terhelés hatására az alapanyagból kiszakadjanak, vagyis az ún. kigombolódás jelensége legyen tapasztalható (**5. ábra**).

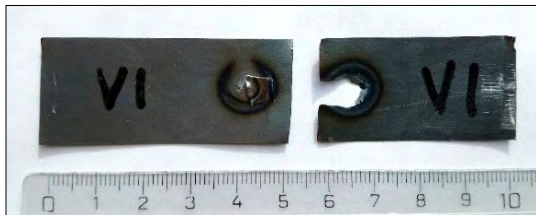
A berendezés tesztelésének következő állomása az ipari gyakorlatban is felmerülő feladatok megoldása volt. A legtöbb, akkumulátorral üzemelő barkácsgéphez, laptopba ún. akkupakkok formájában építik be az akkumulátorcellákat, ezeket 99,97%-os tisztaságú nikkelszalaggal kötik össze. Az elkészített ponthegeztő berendezéssel sikeresen hoztunk létre NiCd és Li-ion cellákból álló akkupakkokat a cellák meghibásodása [15] nélkül, sikeresen megoldva ezzel az alapötletet adó problémát (**6. ábra**). Így lehetőség nyílt megjavítani azokat a berendezéseket, amelyeknél a gyári akkumulátor tönkrement.



**3. ábra.** Az elkészült ponthegeztő a munkakábelekkel és elektródákkal, valamint a lábkapcsolóval



**4. ábra.** Próbatestek készítése nyíró-szakító vizsgálat számára



**5. ábra.** A kigombolódás jelensége egy 0,2 mm vastagságú lemezből készült próbatest esetén



**6. ábra.** Az elkészített ponthegeztő berendezéssel létrehozott Ni-Cd akkupakk



#### 4. Következtetések

Számos lehetőség van a háztartásokban keletkező, sokszor veszélyes elektronikai hulladékok újrahasznosítására, azok megfelelő összegyűjtése és ártalmatlanítása után. Az itt bemutatott ponthegesztő gép erre egy lehetséges példa. Hangsúlyozandó ugyanakkor, hogy a megfelelő szakmai előismeretek és eszközök nélkül a megépítése körülményes, akár veszélyes is lehet. A létrehozott berendezés alkalmas akkumulátorcellák összekötésére, valamint maximum 0,2 mm vastag acéllemezek közötti átlapolt kötések kialakítására. Bár az újrahasznosított alkatrészeknek köszönhetően a gép előállítási költsége minimális egy kereskedelemben kapható hasonló berendezéshez képest, de ipari keretek között, kereskedelmi célra folytatott gyártás során egyéb költségek is felmerülhetnek. Kiemelendő ugyanakkor, hogy a konstrukciós kialakítás során a fenntarthatóságot igyekeztünk korszerű módon biztosítani.

#### Köszönetnyilvánítás

A publikáció az Emberi Erőforrások Minisztériuma NTP-SZKOLL-20-0067 kódszámú Nemzeti Tehetség Program pályázatának támogatásával valósult meg.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Schuler V., Twrdek J.: *Praxiswissen Schweißtechnik*. 6. Auflage. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2019. 98–129.
- [2] Artinger I., Kator L., Romvári P.: *Fémek technológiája*. 3. kiadás. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975. 306–393.
- [3] Singh N. K., Vijayakumar Y.: *Application of Taguchi method for optimization of resistance spot welding of austenitic stainless steel AISI 301L*. Innovative Systems Design and Engineering, 3/10. (2012) 49–61.
- [4] Hegesztéscentrum, Ponthegesztő gépek. 2019. <https://hegesztocesentrum.hu/ponthegesztogeppek.html> (letöltve: 2019. 10. 12.).
- [5] Instructables workshop, MOT Spot Welder. 2013. <https://www.instructables.com/id/MOT-Spot-Welder-1/> (letöltve: 2019. 06. 14.).
- [6] Payen G. R., Klöcker H., Lens A., Wilkinson D. S., Embury J. D.: *Design of an in situ mechanical test for spotwelded joints*, Engineering Fracture Mechanics, 96/12. (2013) 528–538. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.09.002>
- [7] Han L., Thornton M., Boomer D., Shergold M.: *A correlation study of mechanical strength of resistance spot welding of AA5754 aluminium alloy*, Journal of Materials Processing Technology, 211/3. (2011) 513–521. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.004>
- [8] Jou M.: *Experimental Investigation of Resistance Spot Welding for Sheet Metals Used in Automotive Industry*. JSME Int. Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 44/2. (2001) 544–552. <https://doi.org/10.1299/jsmec.44.544>
- [9] Baránszky J. I.: *Hegesztési kézikönyv*. 1. kiadás. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985. 474–515.
- [10] Habib Lebbal, Ahmed Reffas S., Habib Berrekia, Guagliano M.: *Experimental Study of Spot Weld Parameters in Resistance Spot Welding Process*. Mechanics and Mechanical Engineering, 22/1. (2020) 179–186. <https://doi.org/10.2478/mme-2018-0016>
- [11] Békei F., Stefanik P.: *A rádiótechnika évkönyve 2004*. 1. kiadás. Rádióvilág Kft., Budapest, 2004. 179–196.
- [12] Békei F., Stefanik P.: *A rádiótechnika évkönyve 2005*. 1. kiadás. Rádióvilág Kft., Budapest, 2005. 196–207.
- [13] Hainzmann J.: *Elektronikus áramkörök*. 3. kiadás. Tankönyvkiadó, Budapest, 2000. 450–453.
- [14] MSZ EN ISO 14273:2002: *Ellenállás-ponthegesztéssel, -vonalhagesztéssel és zömítő ellenállás-dudorhegesztéssel készített varratok nyíróvizsgálata és a próbatest méretei*. 2002.
- [15] Brand M., Keil P., Grubwinkler S., Jossen A., Lienkamp M.: *Entwicklung und Diskussion einer 12V-Pufferbatterie aus LiFePo4-Akkumulatoren*. 19. Design&Elektronik-Entwicklerforum Batterien & Ladekonzepte, München, 2012.

# Műanyag-vákuumformázó gép tervezése és kivitelezése

## Design and Implementation of a Vacuum Forming Machine

Birton Botond-Antal,<sup>1</sup> Gergely Attila<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Szak, Marosvásárhely, Románia, birtonbotty4@gmail.com

<sup>2</sup> Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, agergely@ms.sapiientia.ro

### Abstract

The purpose of this work is to present the design of a laboratory scale vacuum forming machine, which can be used for the processing of thermoplastic sheets. The designed machine can process an A4 format plastic sheet. An important consideration in the design process was to follow a cost-effective approach. The vacuum forming instrument is made for educational purposes in the framework of a final project for the Polymer Technology Laboratory of the Department of Mechanical Engineering of the Sapiientia EMTE University in Târgu-Mureș. The structure and the operation of the machine is similar to that found in the industry. However, the cost of production is significantly lower. The main components of the machine include the frame, heater, vacuum pump and the clamping device.

**Keywords:** *vacuum forming, thermoplastics, design, processing plastics.*

### Összefoglalás

A dolgozat célja egy vákuumformázó berendezés tervezése és kivitelezése, melyet hőre lágyuló polimer lapok formázására lehet használni. A tervezett berendezés A4-es formátumú műanyag lap megmunkálására alkalmas. A berendezés tervezésekor fontos szempont volt a költséghatékony kivitelezés. A berendezés egy államvizsga-dolgozat keretében a Sapiientia EMTE Marosvásárhelyi Karának Gépészmérnöki Tanszékéhez tartozó Polimertechnológia laboratórium számára készül oktatási célra. A tervezett berendezés felépítése és működése hasonló az iparban használt gépekéhez, az előállítási költsége viszont jelentősen kisebb. A berendezés főbb alkotóelemei közé tartoznak a következők: vázszerkezet, melegítő, vákuumszivattyú, a formázandó műanyaglap befogó szerkezete.

**Kulcsszavak:** *vákuumformázás, hőre lágyuló polimerek, géptervezés, műanyag-megmunkálás.*

## 1. Bevezetés

A vákuumformázott műanyagot először megjelenési és marketingeszközként használták, amikor is kifejlesztették a formázási és vákuumöntési eljárások sorozatából az 1940-es és az 1950-es években. Az első berendezést 1950-ben szabadalmaztatták, amelyet képernyőburkolatok gyártására használtak, ezt követően pedig különböző módszereket és megoldásokat alkalmazván végül 1964-ben szabadalmaztattak egy véglegesített műanyaglap-vákuumformázó berendezést. Mindenik termoplasztikus és vákuumformázó

berendezés egy régi koncepcióból indult ki, amely szerint bármilyen formázási, illetve öntési procedúrában a beszorult fölösleges levegőt vákuum segítségével távolították el. Az öntőszerszámokba beszorult levegő eltávolítása nagyon fontos szerepet játszik mindenféle formázási, illetve öntési eljárásban, mivel gyenge pontokat vezethet be a munkadarabba, ezáltal a szilárdsága már nem lesz megfelelően nagy, és eltörhet vagy elrepedhet. E probléma kiküszöbölésére használják a vákuumot, ezáltal minden beszorult vagy fölösleges levegő eltávolítható, így biztosított a tökéletes és egyenletes formakitöltés [1].

Az eljárást tovább tökéletesítették azzal, hogy a formázandó műanyaglapot egy keretbe rögzíteték, majd mielőtt még formázására került volna, felmelegítették. A melegítés hatására a műanyag lap megpuhul, képlékeny állapotba kerül, ezáltal könnyebben alakítható. A melegítéssel segített formázásnak a berendezését 1968. augusztus 27-én szabadalmaztatták [2].

A vákuumformázás az egyik leggyakoribb és legrégebbi a hőre lágyuló műanyagok megmunkálási módszerei között. Napjainkban a vákuumosan formázott műanyag termékek szinte mindenhol megtalálhatók. Ilyen termékek például az egyszerű csomagolóelemek, játékautók, illetve azok csomagolása, prototípusok stb. [3].

Egyszerű meghatározásaként elmondható, hogy a vákuumformázás egy olyan alakadási folyamat, amely során a felhasználás céljának megfelelő vastagságú, termoplastikus lapot felmelegítjük egy adott hőmérsékletre, amelyen alakítása megfelelően elvégezhető, majd egy kívánt geometriájú és méretű formára nyújtjuk, miközben vákuumot alkalmazunk. A vákuum segítségével a darab tökéletesen felveszi az alakadó forma felületi geometriáját, majd hűtés segítségével permanensen ezt meg is őrzi. Miután a darab megfelelő mértékben lehűlt, megkeményedett, biztonságosan eltávolítják, ügyelve arra, hogy ne károsodjon a felülete vagy változzon az alakja. A darab ezután esetleges utómegmunkálásoknak van alávetve, ahol eltávolítják a felesleges anyagot [4, 5].

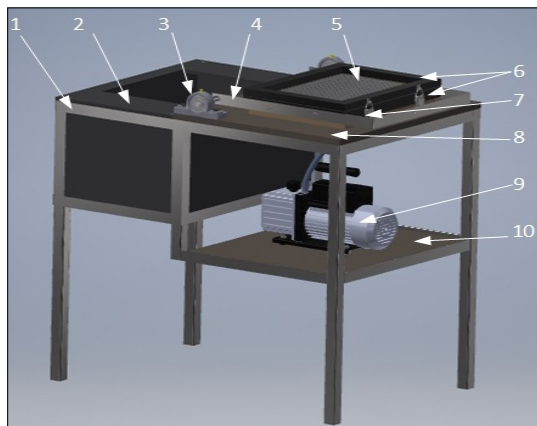
A leggyakrabban felhasznált anyagok a vákuumformázáshoz a HIPS (high impact polystyrene), PVC (polivinil-klorid), ABS (akrilonitril butadién sztírol), PP (polipropilén), PC (polikarbonát) [5].

## 2. A vákuumformázó berendezés bemutatása

### 2.1. Működése és 3D-s modellje

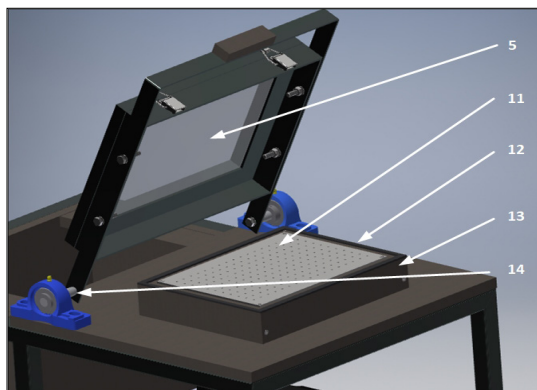
A tervezett vákuumformázó berendezés 3D modellje az 1. ábrán látható. A formázandó nyersanyag 1 mm vastagságú polikarbonát lap. A készülék működése a következő lépésekből áll. Első lépésként a műanyag lap behelyezésére kerül sor, amely úgy történik, hogy két szorítólap (6) közé beszorítjuk, és kampók (7) segítségével rögzítjük, ezzel biztosítva a formázandó lap pozícióját a megmunkálási folyamat során. A berendezés billenő szerkezetű, amely leegyszerűsíti és felgyorsítja a műanyag lap áthelyezésének folyamatát a melegítő- (2) és a formázóegységek között. A formázandó lap felhelyezése után, a második lépésben következik a melegítés folyamata, amely

a készülék bal oldali részében történik. A billenő felfogó lapot (4) balra fordítjuk, és bekapcsoljuk a melegítőt. A melegítés addig történik, ameddig a hőre lágyuló polimer eléri egy olyan hőmérsékletet, amelyen megfelelően képlékeny állapotba kerül és könnyen alakítható. A polimer lapnak ez az állapota szemmel is megfigyelhető, hiszen átlátszóvá válik, vagy színes lap esetén a lap színe megélnkül. Ez a lépés némi tapasztalattal, ill. a melegítési idő mérésével tökéletesíthető. Egy megoldás e folyamat pontosságának javítására a lap hőmérsékletének mérése, viszont a berendezéssel szemben állított költséghatékonyság érte-



1. ábra. A tervezett vákuumformázó berendezés 3D-s modellje.

1 – vázszerkezet, 2 – melegítő doboza, 3 – csapágy, 4 – keret a munkadarab befogószerkezetéhez, 5 – perforált tartólemez, 6 – a munkadarab leszorító lapjai, 7 – leszorító kampók, 8 – a vákuumoszt doboz tartólapja, 9 – vákuumszivattyú, 10 – vákuumszivattyú tartólapja



2. ábra. A tervezett vákuumformázó berendezés 3D-s modellje nyitott állapotban.

5 – perforált tartólemez, 11 – műanyag lap, 12 – gumitömítés, 13 – vákuumdoboz, 14 – tengely



mében ez a kivitelezés egy fejlesztési lehetőségként van megjegyezve. Harmadik lépésként, miután a műanyag képlékennyé vált, bekapcsoljuk a vákuumszivattyút, és átfordítjuk a szorítólapokat (6) a kerettel együtt (4) a készülék jobb oldali részére. Ezen a részen a 13-as vákuumdoboz helyezkedik el, ezen pedig az 5-ös lap található, amelyen sok furat segíti a vákuum hatásának érvényesülését. Erre a tartólemeze (5) helyezzük a kívánt geometriájú formázó elemet. A hőre lágyuló polimer lap ráfeszül az adott formájú tárgyra, majd a vákuum segítségével kiszívódik a kettő közti levegő, ezáltal a műanyag lap felveszi az adott tárgy felületi alakját.

## 2.2. A készülék felépítése

### 2.2.1. Vázszerkezet

A tervezett berendezés egy vázszerkezetre kerül, mely a **3. ábrán** látható. A vázszerkezet 30×30×3 mm-es zártszelvényből, illetve szögacélból készül el hegesztéssel. A vázszerkezet mérete: 800×550×800 mm, bal oldalán a melegítőnek egy 340×540×300 mm méretű rész, míg jobb oldalán a vákuumszivattyúnak egy 440×540×390 mm méretű rész van kialakítva.

### 2.2.2. A hevítőegység

A formázandó, hőre lágyuló műanyag lap melegítésére szolgál egy 1200 W teljesítményű, Zilan márkájú melegítő. A lapokat szükséges felmelegíteni az üvegesedési hőmérséklet ( $T_g$ ) fölé, ami a formázandó műanyag típusától függ. PC esetén a  $T_g = +140\text{ °C}$  [4]. Az ipari berendezésekben használt melegítők kvarc fűtoeleses melegítők vagy kerámialapos melegítők. A költségek csökkentésének érdekében egy közönséges, három kvarc fűtoeleses hőszugárzót használunk (**4. ábra**), melynek teljesítménye fűtoelemenként 400 W, összteljesítménye pedig 1200 W.

### 2.2.3. A műanyag lap rögzítőberendezése

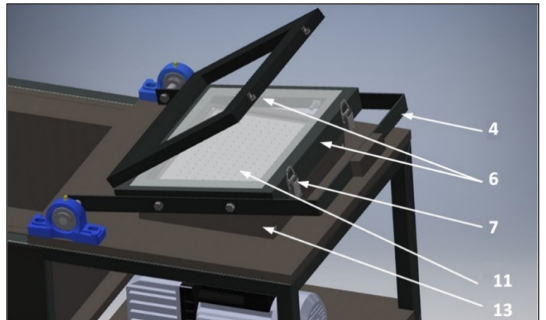
A megmunkálandó, hőre lágyuló polimer lap az alsó, illetve a felső (6-os) keretek közé van beszorítva a két szorítókampó (7) segítségével. Az alsó rögzítőlap, amelyre kerül a műanyag lap, négy darab, 30×30×3 mm-es L profilból van elkészítve, amelyek úgy vannak összehegesztve, hogy az **5. ábrán** látható, négyzet alakú keretszerkezet keletkezzen. A felső rögzítőlap négy darab, 20×30×3 mm-es zártszelvényből készül, amelyek négyszögben vannak összehegesztve. Az alsó, 6-os keret 4 darab M8×20 csavar-anya kötással van rögzítve egy fém kerethez (4), mely a **2. ábrán**



**3. ábra.** A berendezés vázszerkezete



**4. ábra.** A melegítőegység



**5. ábra.** A műanyag lap leszorító szerkezete, illetve a billenőkeret.

4 – keret, 6 – leszorító alsó és felső lapjai, 7 – leszorító kampók, 11 – műanyag lap, 13 – vákuumdoboz

szemléltetett 14-es tengelyek körül képes elfordulni. A forgatható fémkeretet egy U formára hajlított, 30×3 mm méretű lemezből alakítottuk ki. A keret két szárához egy-egy  $\phi 15$  mm átmérőjű tengely van rögzítve M8×30-as csavarkötéssel. A tengelyek csapágyazva vannak, UCP 202 csapágyházas csapágyakkal. A csapágyházak 2-2 darab M8-as csavarkötéssel rögzítve vannak a vázszerkezethez.

### 2.2.4. Vákuumszivattyú

A 11-es polimer lap és az 5-ös tartólap közti tér légtelenítésének érdekében vákuumszivattyút alkalmazunk. A felhasznált szivattyú egy Value V-i120SV, melynek teljesítménye ~184 W, hozama 51 L/min, a végvákuumérték ~0,2 Pa, amely

$0,2 \times 10^{-6}$  barnak felel meg. A szivattyúra egy, a **6. ábrán** szereplő manométer (2) van szerelve, amely a pillanatnyi vákuum értékét mutatja [6].

A vákuumszivattyú a tartólaphoz 8 mm belső átmérőjű FESTO-csővezetékkel kapcsolódik, melynek mindkét végén gyorscsatlakozó található.

### 2.2.5. Vákuumdoboz

A 13-as vákuumdoboz biztosítja az **1. ábrán** feltüntetett, 5-ös tartólap és a műanyag lap közötti vákuum megvalósíthatóságát. A doboz téglalatest alakú, fából készült, méretei  $350 \times 270 \times 51$  mm. A dobozt facsavarokkal rögzítettük a 8-as alaplaphoz, illetve szilikonpasztával biztosítottuk a doboz és az alaplappal közötti tömítést.

A 8-as tartólapban egy  $\phi 14$  mm átmérőjű furat van kiképezve, amelyhez egy  $1/2''$ -os gyorscsatlakozó (15) van rögzítve, ehhez pedig a szivattyú FESTO-csővezete kapcsolódik.

A vákuumdobozra a **2. ábrán** levő 5-ös tartólemez facsavarokkal rögzítettük.

A 12-es gumitömítés a vákuumdoboz és a 11-es műanyag lap alsó, 6-os, tartólapja közötti tömítést biztosítja annak érdekében, hogy a vákuumozás minél hatékonyabb legyen.

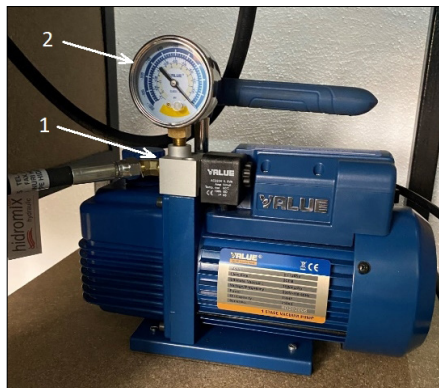
A **8. ábra** a tervezett és kivitelezett vákuumformázó géppel gyártott terméket mutat be. Az ábrán látható, hogy az 1 mm vastagságú PC lapból gyártott termék felvette a formázó elem geometriáját.

## 3. Következtetések

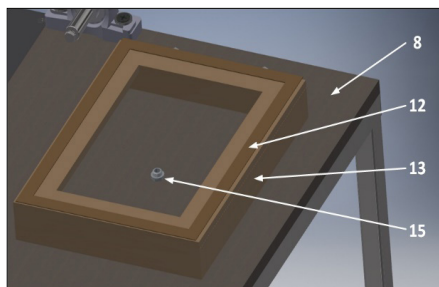
Jelen dolgozatban bemutattuk egy laboratóriumban használt vákuumformázó berendezés felépítését és tervezésének lépéseit. Az oktatási célokra tervezett berendezés felépítése és működési elve hasonló az iparban használt berendezésekéhez, viszont elkészítése olcsóbb. A készülék segítségével a diákok könnyebben elsajátíthatják a vákuumformázás módszerét, illetve különböző laborgyakorlatokat végezhetnek vele.

### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Display developments UK: *The history of vacuum forming*. (letöltve: 2021. 02 03.) <https://www.displaydevelopments.co.uk/be-spoke-manufacturing/the-history-of-vacuum-forming-ib-204.html>
- [2] Alesi J. Jr., Alesi J.: *Vacuum forming apparatus*, 1968. US3398434A
- [3] Advancedtek: *Vacuum forming guide*. (letöltve: 2021. 02 03.) <http://www.advancedtek.com/wp-content/uploads/2018/12/Vacuum-Forming-Guide.pdf>
- [4] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: *A polimertechnika alapjai*. Műegyetemi kiadó, Budapest, 2000. 54.



**6. ábra.** Vákuumszivattyú. 1 – vákuumcsövet csatlakozása, 2 – manométer [6]



**7. ábra.** A vákuumdoboz modellje. 8 – vákuumdoboz tartólapja, 12 – gumitömítés, 13 vákuumdoboz, 15 – vákuumcső-csatlakozó



**8. ábra.** A tervezett vákuumformázó géppel gyártott darab

- [5] C. W. Thomas: *Thermoforming Design Guide*. (letöltve: 2021. 02 03.) <https://www.cwthomas.com/wp-content/uploads/2016/12/Design-Guide.pdf>
- [6] Valuetool: *Vacuum pump V-i20SV*. (letöltve: 2021. 02 03.) [https://valuetool.pl/en/offer/value-products/vacuum-pumps/single-stage-vacuum-pumps/v-i20sv/product\\_data\\_sheet](https://valuetool.pl/en/offer/value-products/vacuum-pumps/single-stage-vacuum-pumps/v-i20sv/product_data_sheet)

# Üvegszál-erősítésű kompozit fogtömések vizsgálata

## Examination of Glass-Fibre Reinforced Composite Dental Fillings

Borhy Levente,<sup>1</sup> Farkas Péter Zoltán,<sup>2</sup> Volom András<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, borhy.levente@edu.bme.hu

<sup>2</sup> Dr. Volom Esztétikai Fogászat, Budapest, Magyarország, farkas.peter013@gmail.com

<sup>3</sup> Dr. Volom Esztétikai Fogászat, Budapest, Magyarország, drvolom@drvolomdental.hu

### Abstract

In dentistry, the use of dental fillings is a routine procedure. The use of fillings is a cheap, simple and low-harm dental operation, however, the filling of deep cavities is a difficult task. During this research, three types of fillings were tested: composite fillings bonded directly to the cavity walls, fillings bonded to the cavity walls with a semi-direct method, and composite fillings bonded to the cavity lined with polyethylene fibres. In the course of our examinations, the gaps between the wall of the dental cavity and the dental filling were observed using scanning electron microscopy. The results of these measurements can be used to determine the quality of each type of filling procedure.

**Keywords:** *composite dental fillings, microstructural measurements, biomimetics.*

### Összefoglalás

A fogászatban ma már mindennapos eljárásnak számít a fogak kompozit tömésel való ellátása. Ez a legtöbb esetben egyszerű és foganyagkímélő (minimálinvazív) beavatkozás, azonban a mély üregek tömése kihívást jelent. Kutatásunk során háromféle töméstípust vizsgáltunk: közvetlenül a fogban polimerizált kompozit tömést, közvetett módon az üregbe ragasztott (ún. semi-direct) tömést, illetve polietilén rosttal erősített kompozit tömést. Vizsgálataink során pásztázó elektronmikroszkóp segítségével figyeltük meg a fogtömés és a betömött üreg falai között keletkező réseket, illetve a résképződés mértékét, ezekből következtetve az egyes töméstípusok minőségére és várható tartósságára.

**Kulcsszavak:** *kompozit fogtömés, mikroszerkezeti vizsgálat, biomimetika.*

## 1. Bevezetés

A szájiüregi betegségek a becslések szerint körülbelül 3,5 milliárd embert érintenek világszerte. Ezen belül, a WHO adatai szerint a felnőtt népesség közel 100%-ának van szuvas foga [1]. A szuvas fogak helyreállítása tehát igen lényeges közegészségügyi feladat. A helyreállítás módszertana és anyagtana ennek megfelelően a fogorvostudomány dinamikusan fejlődő területe.

A fog fő állományát, a fog koronájától a foggyökérig a dentin alkotja. A dentin egy kemény, de egyben rugalmas, szerves összetevőkben gazdag

szövet, amelyet a koronai részen zománc, a gyökéri részen pedig cement borít. A dentin rugalmas és erős alátámasztást nyújt a sokkal keményebb, ridegebb, szerves összetevőt alig tartalmazó zománcnak [2]. A dentin és a zománc között egy hátraréteg található, amely erős kötést biztosít a két szövetféleség között [3].

### 1.1. Biomimetika

A biomimetika olyan innovatív, multidiszciplináris megközelítés, amely elsősorban a biológia és műszaki vagy más tudományok együttműködésén alapul, és célja, hogy biológiai rend-

szerek modellezésével különféle gyakorlati problémákra dolgozzon ki megoldásokat [4]. A biomimetikus fogászati célja a károsodott fogak egyes szövetfeleségeinek helyreállítása anyagok és eljárások olyan kombinációival, amelyekkel az ép, élő foghoz biomechanikai és esztétikai szempontból is leginkább közelítő szerkezet hozható létre [5–7]. A fogászati biomimetikus megközelítésének kiemelt céljai közé tartozik a megmaradt foganyag és a restaurátum (pl. tömés) közötti kötőerő maximalizálása a restaurátum beragasztása során, illetve a fog és a restaurátum által alkotott rendszeren belüli feszültségek csökkentése a tartósság növelése érdekében.

Ami a kötőerőt illeti, ennek legnagyobb elérhető mértéke a ragasztással érintett szövetfeleségtől is függ, így különböző módon kell eljárni a zománchoz és a dentinhez való ragasztás során. A kötés létrehozásakor egy úgynevezett hibrid réteg keletkezik, amely a demineralizált (ortofoszforsavval előkezelésként ásványianyag-mentesített) dentin kollagénrostjainak hidrofil gyantával infiltrált, megerősített átmenetet képező rétege. Fontos, hogy a rétegnek bizonyos stabilizációs (a fogorvosi szakirodalomban gyakran: érési) időre van szüksége, különben nem jön létre elég erős kötés, és a későbbiekben ez szétváláshoz és másodlagos szuvasodáshoz vezethet [8, 9].

Amint említettük, a dentin és a zománc ragasztása során eltérő kötőerő érhető el. Ebből az következik, hogy a tömésre használt kompozit fotopolimerizációja során bekövetkező zsugorodás (amennyiben a kompozitot a fogon belül polimerizáljuk) adott esetben ahhoz vezethet, hogy a restaurátum legalább az egyik szövetfeleségtől elválik. Ebből érthető, hogy a polimerizációs zsugorodás mérséklése kulcsfontosságú a hosszú távú sikeresség szempontjából [10]. Ennek egy lehetséges módja az üregbeli szálerősítés alkalmazása, ami a zsugorodási feszültség elnyelése útján csökkenti a szétválás kockázatát [11]. Egy másik lehetséges eljárás az ún. szemidirekt vagy közvetett dentinpótlás. Tanulmányunk szempontjából ezzel az eljárással kapcsolatban fontos kiemelni, hogy ennek során a polimerizáció a fogon kívül történik, így a hibrid réteget nem éri közvetlen húzófeszültség, és annak stabilizációjához is bővebb idő áll rendelkezésre [12].

A fogászatban a c-faktor a fogrestauráció során a tömés ragasztott és nem ragasztott felületeinek arányát jelenti. Minél nagyobb ez az érték (tehát minél több a ragasztott felület), annál inkább számolni kell a polimerizáció során fellépő károsodásokkal. Vizsgálatunk során I. osztályú, 5-ös

c-faktorú üregeket vizsgáltunk, amelyek a polimerizáció nemkívánatos szerkezeti hatásai szempontjából jelenleg a legnagyobb kihívást jelentik. Ezeket az üregeket általában hagyományos módon, 2-3 rétegben tömük be, ami viszont nagy belső feszültségeket indukál, és akár repedéshez is vezethet [13, 14].

A korszerű szakirodalomban a fogtöméseket mikroszerkezeti és mikroszakító kötészilárdsági vizsgálatokkal értékeli [15–17], így kutatásunk során olyan innovatív fogtöméseket vizsgálunk, amelyekkel várhatóan kiváltható lehet a fogat borító korona használata több esetben, és lehetséges ezzel a fog természetes részének megőrzése a lehető legnagyobb mértékben.

Célunk az eddig használt fogtöméseknél rugalmasabb, résmentes kapcsolat létrehozni egy újszerű dentinpótló kompozit anyaggal.

## 2. Anyagok és módszerek

Vizsgálatunk során töméssel restauráltunk I. osztályú üregeket. A restaurálást minden esetben ugyanaz a fogorvos (F. P. Z.) végezte.

### 2.1. Anyagok

Tömőanyagunk EverX Posterior, üvegszál-megerősítésű kompozitot használtunk, amelyet azért fejlesztettek ki, hogy a dentint helyettesítse direkt (közvetlenül a fogban készített), nagy c-faktorú, mély üregek tömése esetén. Üregbeli szálerősítésnek különleges szövésű, Ribbond típusú polietilén rostot használtunk. A pótlás beragasztásához használt kötőanyag minden esetben Kuraray Clearfil SE Protect, kétkomponensű, 6. generációs kötőanyag (ún. önsavazó bond) volt. A tömés fedésére Estelite Asteria Syringe nanokompozitot alkalmaztunk, a közvetett módon (a fogon kívül készített, ún. szemidirekt) tömés fogba való visszahelyezésekor pedig Cosmesdent Renamel Microfill folyékony, kompozit tömőanyaggal töltöttük ki a fog és a már polimerizált kompozit tömb közötti teret.

### 2.2. A fogrestauráció módszerei

A vizsgálatokhoz egyébként szerkezetiileg ép, megelőzés céljából eltávolított bölcsességfogakat alkalmaztunk. A fogakat a vizsgálat megkezdéséig, illetve annak egyes lépései között 0,5%-os szobahőmérsékletű Chloramin T oldatban tároltuk a kiszáradás elkerülése érdekében.

A fogtömések előkészítése során a fogakba 4×4×4 mm-es, I. osztályú mély üreget hoztunk létre fúrással. Ezt követően minden fog esetén a háromféle eljárást egyikezt követtük, így kialakítva a három vizsgálati csoportot.



Az első csoportban EverX kompozittal egy lépésben feltöltött töméseket készítettünk közvetlenül a fogon belül.

A második csoportban a kompozit tömés polimerizálása a fogon kívül történt meg, és a tömést ezt követően ragasztottuk be (indirekt vagy szemidirekt eljárás).

A harmadik csoport sajátossága az volt, hogy kötőanyaggal (adhezívvel) nedvesített polietilén erősítést alkalmaztunk az egy lépéses feltöltést megelőzően.

### 2.3. Mérési módszerek

A betömött fogakat a vizsgálatokhoz a következő módon készítettük elő. A fogakat először 20 mm átmérőjű szilikohengerekben Duracryl Plus, kétkomponensű műgyantába ágyaztuk be. Térhálósodás után a hengert Buehler IsoMet 1000 gyémánttárcsás vágógéppel 200 1/min fordulaton, a lehetséges legkisebb terhelés mellett hosszanti irányban elvágtuk, amelyet utána P600, majd P1200 finomságú papírral csiszoltunk, majd ezután 3 µm-es gyémántszemcsés folyadékkal políroztunk.

Ezekről a mintákról először kisebb nagyítású felvételeket készítettünk Zeiss EVO MA10 pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM), 20 kV gyorsítófeszültséggel a tömés és fog közötti rések vizsgálatára, majd nagyobb nagyításban is vizsgáltuk a létrejövő rétegeket. Mivel a gyanta és a fog rossz elektromos vezetők, ezért a felületet vékony aranyréteggel vontuk be a vezetőképesség biztosítására.

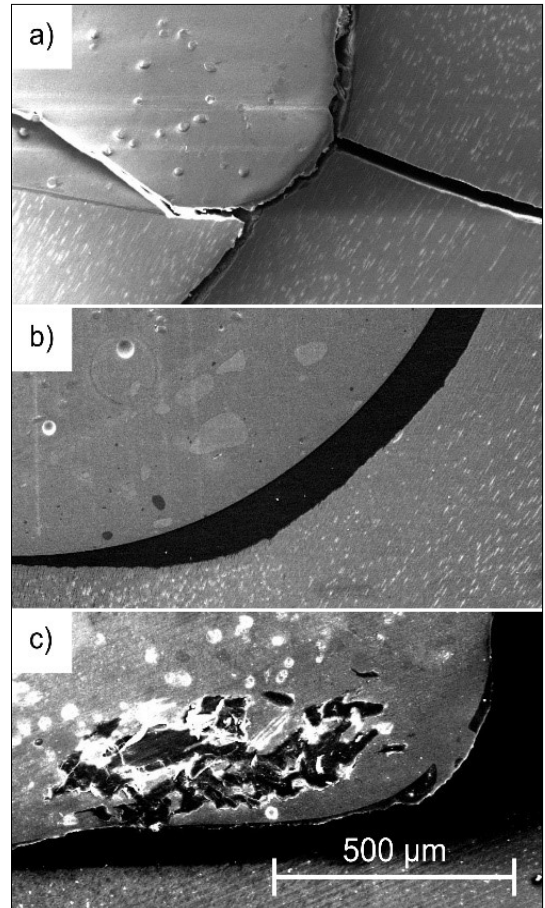
## 3. Eredmények

A mikroszkópi képeken (1. ábra) megfigyelhető a tömés és fog között keletkezett esetleges rés, illetve a résképződés mértéke.

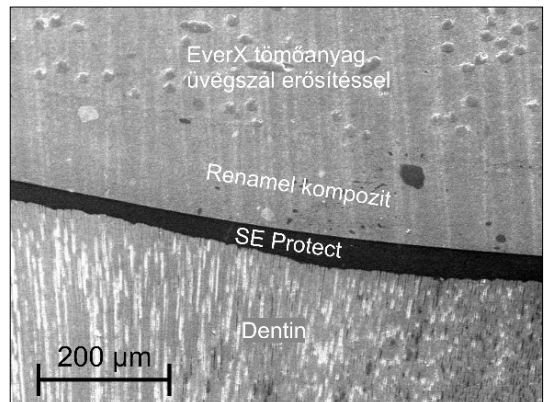
Látható, hogy a közvetlenül a kötőanyagra helyezett, EverX típusú dentin pótló anyag a feszültséggyűjtő helyeken, azaz a sarkoknál minimálisan elvált, ami élőben posztoperatív érzékenységet okozhat és szuvasodás alapja lehet.

A nagyobb nagyítású SEM-felvételen megfigyelhető, hogy a külső polimerizálású módszerrel tömött fogak esetén jól elkülöníthetők az egyes rétegek (2. ábra), és itt az egész síkban nem volt megfigyelhető résképződés.

A Ribbond polietilénrosttal erősített fog esetében a minta-előkészítésnél a fog önmagában megrepedt (1. ábra c), és a tömés sarkainál részleges elválás volt tapasztalható. Ebben a vizsgálatban tehát a polietilénrosttal történő megerősítés nem tudta teljesen megakadályozni a résképződést, bár láthatóan teljesen hatástalan sem volt.



1. ábra. SEM-felvétel a fogon belül polimerizált kompozittal készült (a), a fogon kívül polimerizált és utóbb beragasztott kompozittal készült (b), valamint a Ribbond-szalaggal előkészített (c) tömésekről



2. ábra. SEM-felvétel a fogon kívül polimerizált kompozitot alkalmazó (közvetett vagy szemidirekt) tömés rétegeiről

#### 4. Következtetések

Eredményeink szerint jelentős részképződés egyedül a közvetlenül EverX-szel tömött mintán volt tapasztalható. Ennél kisebb mértékű volt az elválás, ha a tömést polietilénrostozattal erősítettük, abban az esetben pedig, ha a kompozit polimerizálása a fagon kívül ment végbe, és csak azt követően ragasztottuk be az üregbe, akkor egyáltalán nem észleltünk részképződést vagy elválást. Meg kell azonban jegyezni, hogy a kis elemszám miatt vizsgálatunk leginkább tájékoztató vizsgálatnak tekinthető, erős következtetések levonására nem alkalmas. Az itt közölt eredmények egyfelől a vizsgálati módszertan alkalmazhatóságát igazolják, másfelől alapot adnak további, számszerűen is értelmezhető vizsgálódásnak.

Vizsgálatainkat a jövőben nagyobb elemszámú mintán a kötésszilárdság vizsgálata irányába is ki kívánjuk terjeszteni, hogy ilyen módon a restaurátumok megfelelőségéről a kvalitatív adatokon felül kvantitatív, statisztikai elemzésre is alkalmas adatokhoz jussunk.

#### Köszönetnyilvánítás

A publikáció az Innovációs és Technológiai Minisztérium NTP-SZKOLL-20-0067 kódszámú Nemzeti Tehetség Program pályázatának támogatásával valósult meg. A szerzők köszönetet mondanak dr. Brunitzer Gábornak a kéziratot illető orvosszakmai és közlésmódszertani szempontú észrevételeiért.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] GBD 2017 Disease and Injury Incidence and Prevalence Collaborators.: Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 354 diseases and injuries for 195 countries and territories, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017, *The Lancet*, 392. (2018) 1789–1858. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32279-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32279-7)
- [2] Nanci A.: *Chapter 8. Dentin-Pulp Complex*. In: *Ten Cate's Oral Histology* (8. Ed.). Mosby, 2013. 165–204. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-07846-7.00008-2>
- [3] Urabe I., Nakajima S., Sano H., Tagami J.: *Physical properties of the dentin-enamel junction region*. *American Journal of Dentistry*, 13. (2000) 129–135.
- [4] ISO 18458: Biomimetics – Terminology, concepts and methodology, 2015.
- [5] Bazos P., Magne P.: *Bio-emulation: biomimetically emulating nature utilizing a histoanatomic approach; structural analysis*. *The European Journal of Esthetic Dentistry*, 6. (2011) 8–19.
- [6] Alleman D. S., Nejad M. A., Alleman D. S.: *The Protocols of Biomimetic Restorative Dentistry: 2002 to 2017*. *Inside Dentistry*, 13. (2017) 1–6.
- [7] Zafar M. S., Amin F., Fareed M. A., Ghabbani H., Riaz S., Khurshid Z., Kumar N.: *Biomimetic Aspects of Restorative Dentistry Biomaterials*. *Biomimetics*, 5. (2020) 34. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-07846-7.00008-2>
- [8] Kemény A., Hajdu I., Károly D., Pammer D.: *Osseointegration specified grit blasting parameters*. *Materials Today: Proceedings*, 5/13. (2018) 26622–26627. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.08.126>
- [9] van Meerbeek B., Yoshihara K., van Landuyt K., Yoshida Y., Peumans M.: *From buonocore's pioneering acid-etch technique to self-adhering restoratives. A status perspective of rapidly advancing dentai adhesive technology*. *The Journal of Adhesive Dentistry*, 22. (2020) 7–34. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a43994>
- [10] Yadav R., Kumar M.: *Dental restorative composite materials: A review*. *Journal of Oral Biosciences*, 61. (2019) 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.04.001>
- [11] Sadr A., Bakhtiari B., Hayashi J., Luong M. N., Chen Y. W., Chyz G., Chan D., Tagami J.: *Effects of fiber reinforcement on adaptation and bond strength of a bulk-fill composite in deep preparations*. *Dental Materials*, 36. (2020) 527–534. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.01.007>
- [12] Jayasooriya P. R., Pereira P. N. R., Nikaido T., Tagami J.: *Efficacy of a resin coating on bond strengths of resin cement to dentin*. *Journal of Esthetic Restorative Dentistry*, 15. (2003) 105–113. <https://doi.org/10.1111/j.1708-8240.2003.tb00325.x>
- [13] Nikolaenko S. A., Lohbauer U., Roggendorf M., Petschelt A., Dasch W., Frankenberger R.: *Influence of c-factor and layering technique on microtensile bond strength to dentin*. *Dental Materials*, 20. (2004) 579–585. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2003.08.001>
- [14] Sakaguchi R. L., Peters M. C. R. B., Nelson S. R., Douglas W. H., Poort H. W.: *Effects of polymerization contraction in composite restorations*. *Journal of Dentistry*, 20. (1992) 178–182. [https://doi.org/10.1016/0300-5712\(92\)90133-W](https://doi.org/10.1016/0300-5712(92)90133-W)
- [15] Sano H., Chowdhury A. F. M. A., Saikaew P., Matsumoto M., Hoshika S., Yamauti M.: *The micro-tensile bond strength test: Its historical background and application to bond testing*. *Japanese Dental Science Review*, 56. (2020) 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2019.10.001>
- [16] Magne P., Ubaldini A. L. M.: *Thermal and bioactive optimization of a unidose 3-step etch-and-rinse dentin adhesive*. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 124 (2020) 487.e1–487.e7. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.03.011>
- [17] Hayashi J., Espigares J., Takagaki T., Shimada Y., Tagami J., Numata T., Chan D., Sadr A.: *Real-time in-depth imaging of gap formation in bulk-fill resin composites*. *Dental Materials*, 35. (2019) 585–596. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.01.020>

## Befogókészülék fejlesztése koponyaűri áramlásirányító sztentek húzóvizsgálatához

### Development of a Clamping Device for Tensile Testing of Intracranial Flow Diverter Stents

Bukor Csongor,<sup>1</sup> Károly Dóra,<sup>2</sup> Csippa Benjamin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, [bukorcsongor@edu.bme.hu](mailto:bukorcsongor@edu.bme.hu)

<sup>2</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, [kdora@eik.bme.hu](mailto:kdora@eik.bme.hu)

<sup>3</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék, Budapest, Magyarország, [bcippa@hds.bme.hu](mailto:bcippa@hds.bme.hu)

#### Abstract

The main danger of a brain aneurysm (a sack-like bulge on the vessel wall) is that in the event of a rupture a severe hemorrhage can occur which may cause death. However, if doctors have tools at their disposal, such as numerical models and simulations for analyzing patient-specific blood vessels, they could use them to decide if a particular treatment is necessary and if so, when. For such models, the different mechanical characteristics of the flow control devices are the input data. Several of these mechanical properties of the devices, such as modulus of elasticity and tensile strength, are determined by tensile testing. In the course of our research, we have developed a clamping device suitable for uniaxial tensile testing of flow diverter stents.

**Keywords:** *uniaxial tensile testing, mechanical properties, clamping device.*

#### Összefoglalás

Az aneurizmák (értágulatok) legfőbb veszélyét az jelenti, hogy az érfalra ható igénybevételek miatt kirepedhetnek, ezáltal súlyos belső vérzést, halált okozhatnak. Ha azonban az orvosnak rendelkezésére állnak olyan mérnöki eszközök, mint például az artériák elemzésére alkalmas numerikus modellek, szimulációk, ezek segítségével el lehet dönteni, hogy egy adott értágulatnál szükséges-e a beavatkozás, és amennyiben igen, mikor. Az ilyen modellekhez az áramlásirányító eszközök mechanikai jellemzői bemeneti adatok. Több ilyen mechanikai tulajdonság, például a rugalmassági modulusz és a szakítószilárdság meghatározása szakítóvizsgálattal történik. Kutatásaink során ilyen eszközök egytengelyű húzóvizsgálatára is alkalmas befogókészüléket fejlesztettünk, több méretben, a különböző érátmérőkhöz tartozó sztentekhez.

**Kulcsszavak:** *szakítóvizsgálat, mechanikai tulajdonságok, befogókészülék.*

#### 1. Bevezetés

A verőerek tágulatainak, az ún. aneurizmáknak egyik legnagyobb veszélye az elvékonyodott érfal megrepedése következtében kialakuló vérzés, amelynek szövődményeiben a betegek kb. 15%-a meghal, mielőtt a kórházba érne [1].

A koponyaűri értágulatok kezelésére többek között olyan, hálós szerkezetű, biokompatibilis

eszközöket, áramlásirányító sztenteket – a továbbiakban ezeket sztentnek nevezzük – használnak, amelyek áramlásmódosító, -irányító hatást fejtenek ki a sérült érszakaszon, így csökkentve az érfalra jutó nyomást, amit a vér áramlása okoz, ezáltal megalvasztva a vért az aneurizmazsákban [2, 3].



Az ilyen sztentek fő hemodinamikai hatása a véráramlás irányítása és lassítása az aneurizmában. Az érszakasz és az értágulat között megváltoztatva a dinamikus folyadékcseret, olyan hemodinamikai, intraaneurizmás környezetet hoznak létre, amely elősegíti az aneurizmazsákon belüli trombózis kialakulását [4, 5].

Egy szimuláció végeredményének megbízhatóságát nagyban befolyásolja a bemeneti adatok pontossága. A minták ideális vizsgálati módja a valós élettani feltételek között, vagyis a saját környezetükben történő, azaz *in vivo* vizsgálat. Azonban ez invazív mivolta és etikai szempontok miatt nem alkalmazható. Helyette az adott érszakasz vizsgálatára csak a valós peremfeltételeket megközelítő, *in vitro* vizsgálat jöhet számításba [6].

Kutatásunk célja bemeneti adatokat szolgáltatni egy olyan mechanikai modellhez, amellyel szimulálható az áramlásirányító sztentek feltágítása egy konkrét beteghez tartozó aneurizmamodellben. A sztentmodellben a szálakat a szálak keresztezésénél csatlakozó felületi rugókra cserélik, és kiegészül a modell radiális irányban álló, fiktív rugókkal. A mechanikai tulajdonságokat a két különböző rugótípuson keresztül modellezzük, eltérő rugóállandókkal [7]. Az egyik ábrázolja a felületi mechanikát (pl. a hosszmenti összehúzódás), míg a másik a radiális irányú tágulás modellezéséhez szükséges. Ehhez szükség van a sztentek húzóvizsgálatára és a vizsgálat közben az átmérőváltozás detektálására.

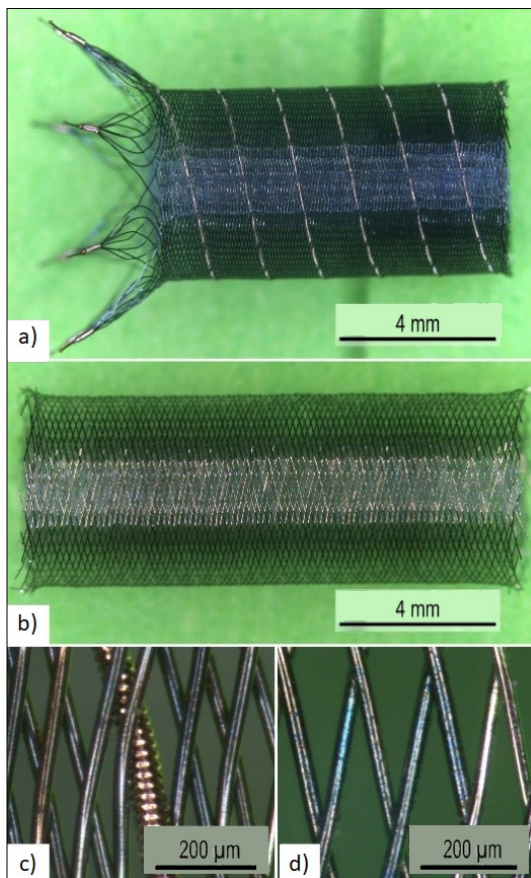
## 2. Felhasznált anyagok és mérési módszerek

### 2.1. Áramlásirányító sztentek

Az 1. ábrán látható két sztent befoglaló méretei az 1. táblázatban láthatók. Az egyik vizsgált áramlásirányító sztent Ni-Ti ötvözetből, a másik Co-Cr ötvözetből készült. A gyártó azt a hosszmeretet írja a dobozra, amelyet egy konstans át-

1. táblázat. A felhasznált áramlásirányító sztentek adatai

Jel	Ni-Ti sztent	Co-Cr sztent
Névleges átmérő (mm)	5	5
Gyártói ajánlott hossz (mm)	24	20
Tömeg (mg)	25,5	29,9
Átmérő (mm)	5,22 ±0,019	5,22 ±0,034
Hosszúság (mm)	11,63 ±0,070	12,75 ±0,0391



1. ábra. A Ni-Ti sztent (a), a Co-Cr sztent (b) teljes egésze, a Ni-Ti sztent bordái (c) és a Co-Cr sztent bordái (d)

mérőjű érszakaszmodellben venne fel a sztent tökéletes körülmények között. A gyártói hossz általában más, mint a feltágítás utáni értékek, mivel az operáló orvos általi manuális beavatkozás befolyásolhatja a sztent elhelyezkedését. A mért átmérőértékek szabad, feszültségmentes állapotban nagyobbak, mint a gyártó által megadott, névleges átmérő. Az 1c) ábrán látható Ni-Ti sztentnél egyértelműen látszik a szövésben 15 db, hosszanti bordánként elhelyezett markerszál, amelyeket keresztbe, két-két szomszédos szál alá és fölé szőnek a szerkezetbe. A Co-Cr sztentnél ilyen markerszál nem figyelhető meg.

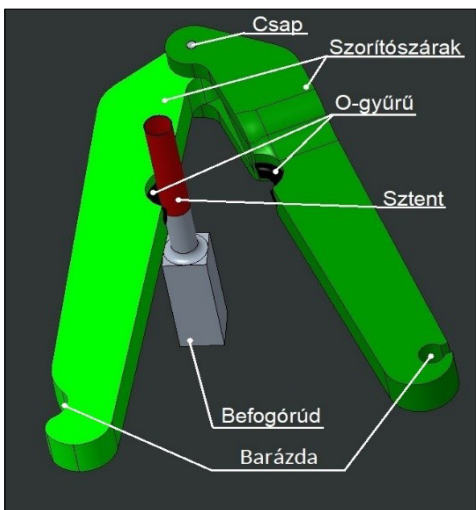
### 2.2. A befogókészülék tervezése

A szakítóvizsgálat szempontjából a berendezésen kívül sarkalatos pont a megfelelő befogókialakítás. A mi esetünkben ez kiemelkedő szerepet kap, mivel a vizsgált minták nagyon könnyen károsodnak.



A befogó tervezése során az alábbi szempontokat vettük figyelembe. Elsősorban kellően nagy szorítóerőt kell kifejtenie, hogy megakadályozza a sztent megcsúszását. Ezt az erőt a kerület mentén kis felületen kell átadni a sztentre az egyenletes alakváltozás és a befogási hossz egyértelmű meghatározhatósága érdekében, illetve biztosítani kell, hogy a szorítóerő a lehető legkisebb mértékben deformálja a sztentet. Ezenkívül a befogónak kis tömegűnek kell lennie, és lehetővé kell tennie azt, hogy kézi erővel gyorsan és pontosan be tudjuk vele fogni a sztentet. Végezetül célunk volt az egyszerű és kötséghatékony gyárthatóság, illetve beszerezhetőség is.

Eleinte egy rendkívül egyszerű konstrukciót alkalmaztunk. A sztent két végét egy-egy szilikonnal borított tengelyre húztuk, és kívülről egy-egy gyorskötöző segítségével kialakítottuk a szorítóerőt a sztent két végén. A gyorskötöző alá a sztent sérülésének elkerülése érdekében szintén vékony szilikonborítást tettünk. A húzóvizsgálat-hoz a két tengelyt fogtuk be a szakítógépbe. Ezzel a megoldással csak lassan és pontatlanul lehetett befogni a sztenteket, illetve a befogási hossz meghatározása is nehézkes volt. Ez a probléma a 2. ábrán látható befogókészülék megtervezéséhez vezetett. Az új konstrukcióban a befogórúdra húzzuk rá a sztentet, kívülről pedig a csap körül elforduló két szorítószár közé fogjuk be. A befogás helyén egy O-gyűrű viszi át az erőt. A szárak végén egy-egy barázda lehetővé teszi, hogy egy gumigyűrűvel kialakítsuk a szorítóerőt. A befogót Formlabs Form 2 berendezéssel, additív gyártással gyártottuk le.



2. ábra. A befogó szerkezeti modellje

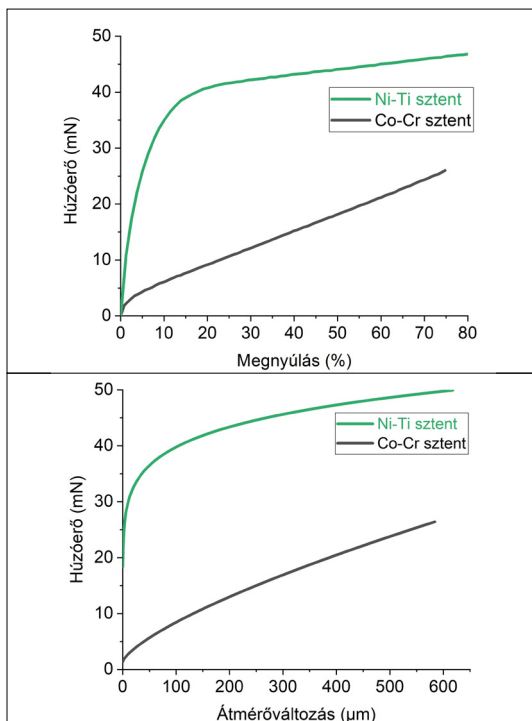
## 2.3. Mérési módszer

A húzóvizsgálatokat INSTRON 5965 típusú, elektromechanikus anyagvizsgáló berendezéssel végeztük, amelyhez rendelkezésre áll egy  $\pm 5$  N méréshatárú erőmérő cella, és egy hozzá tartozó, szintén 5 N terhelhetőségű, pneumatikus befogó, így nagyon pontos méréseket tudunk végezni ebben a kis erőtartományban is. A mérést 10 mm keresztfej-elmozdulásig folytattuk, 6 mm/min keresztfej-elmozdulási sebességgel.

A sztent axiális irányú húzása közben létrejövő átmérőcsökkenést fényképezőgéppel detektáltuk, a mérés kezdetétől 1 s időközönként készítve fényképet a mérés végezetéig. Így lett pontosan látható és mérhető a sztentek átmérőjének csökkenése. Az átmérőket a befogófejek közt felúton mértük le, és ebből számoltuk ki az átmérőváltozást.

## 3. Eredmények

A vizsgálat során a 3. ábrán látható görbéket kaptunk, amelyeken jól látható a szignifikáns különbség a Ni-Ti és a Co-Cr sztent viselkedése között. A Ni-Ti sztent átmérőváltozásához és nyúlásához nagyobb erőre van szükség, mint a Co-Cr sztentnél. A Ni-Ti ötvözet anyagú sztent 50%-os



3. ábra. A Ni-Ti és a Co-Cr sztent húzóvizsgálatának eredménye, felül: erőmegnyújtás diagram, alul erő-átmérőváltozás diagram

nyúlásához több mint kétszer akkora erőre van szükség, mint a Co-Cr ötvözet anyagú sztentnél. A 3. ábrán látható húzóerő-átmérőváltozás görbe kezdeti (függőleges) szakasza mutatja azt a részt, amikor a sztentek az erő növekedése mellett nem reagálnak átmérőváltozással, ebből lehet következtetni a mechanikai modellben a sztentek palástfelületén levő rugalmas elemek rugóállandóira, a görbe befejező szakaszából pedig a radiális irányú rugók viselkedésére tudunk következtetni [7].

#### 4. Következtetések

A tervezett befogó és a mérési módszer alkalmas a koponyaúri áramlásirányító sztentek húzóvizsgálatára.

A vizsgálat eredményeként megállapítható, hogy a Ni-Ti ötvözet alapanyagú sztent ugyanakkora mértékű megnyújtásához nagyobb erőre van szükség, mint a Co-Cr ötvözet anyagú sztentnek.

A kutatás folytatásaként a befogó segítségével többféle áramlásirányító sztent húzóvizsgálatát fogjuk elvégezni, és az eredmények alapján a már említett modellt pontosítani. Ezenkívül a mérés segítségével új, sztentekhez hasonló geometriával rendelkező eszközök minősítése is lehetséges, amelyek szintén integrálhatók a teljes mechanikai modellbe.

#### Köszönetnyilvánítás

A publikáció az Innovációs és Technológiai Minisztérium NTP-SZKOLL-20-0067 kódszámú Nemzeti Tehetség Program, illetve a 2017-1.2.1-NAP-2017-00002 Nemzeti Agykutatási Program támogatásával valósult meg, valamint a kutatást támogatta az NKFIH Alap (TKP2020 IES, tsz: BME-IE-NAT; TKP2020 NC, tsz: BME-NCS) az Innovációs és Technológiai Minisztérium vezetése alatt.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Chalouhi N., Hoh B.L., Hasan D.: *Review of cerebral aneurysm formation, growth and rupture*. Stroke, 44/12. (2013) 3613–3622.  
<http://doi.org/10.1161/STROKEAHA.113.002390>
- [2] Szikora I., Berentei Z., Kulcsar Z., Marosfoi M., Vajda Z. S., Lee W., Berez A., Nelson P. K.: *Treatment of intracranial aneurysms by functional reconstruction of the parent artery: the Budapest experience with the pipeline embolization device*. American Journal of Neuroradiology, 31/6. (2010) 1139–1147.  
<http://doi.org/10.3174/ajnr.A2023>
- [3] Alderazi Y. J., Shastri D., Kass-Hout T., Prestigiacomo C. J., Gandhi C. D.: *Flow diverters for intracranial aneurysms*. Stroke Research and Treatment, 2014. 1–12.  
<http://doi.org/10.1155/2014/415653>
- [4] Asztalos L., Nagy P., Bognár E., Szikora I.: *Pattern Change of Flow Diverters due to Bending*. Journal of Biomechanical Engineering and Biosciences, 4. (2017) 19–22.
- [5] Fu W., Xia Q.: *Interaction between flow diverter and parent artery of intracranial aneurysm: a computational study*. Applied Bionics and Biomechanics, 1. (2017) 1–9.  
<http://doi.org/10.1155/2017/3751202>
- [6] Ugron Á., Paál Gy.: *On the boundary conditions of cerebral aneurysm simulations*. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 58/1. (2014) 37–45.  
<http://doi.org/10.3311/PPme.7392>
- [7] Závodszy G., Csippa B., Paál Gy., Szikora I.: *A novel virtual flow diverter implantation method with realistic deployment mechanics and validated force response*. International Journal of Numerical Methods in Biomedical Engineering, 36/6. (2020) e3340.  
<http://doi.org/10.1002/cnm.3340>

# Politejsav fóliák pneumatikus alakíthatósági vizsgálatának fejlesztése

## Development of Pneumatic Deformability Test of Polylactic Acid Films

Gere Dániel,<sup>1,2</sup> Pölöskei Kornél<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Budapest, Magyarország, [gered@pt.bme.hu](mailto:gered@pt.bme.hu)

<sup>2</sup> IMSYS Mérnöki Szolgáltató Kft. Budapest, Magyarország

<sup>3</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Budapest, Magyarország, [poloskei@pt.bme.hu](mailto:poloskei@pt.bme.hu)

### Abstract

The aim of the present study is to develop a test method suitable for modelling thermoforming processes and which provides an index that accurately characterises the thermoformability of a film or sheet at a given temperature and pressure. For this purpose, the elevated temperature pneumatic deformability test was considered to be the most suitable. During the test, the film is blown until it tears, which takes only a few seconds. We recorded blowing during the test, and used the images to determine the ascent ( $k$ ) of the specimens and approach the estimated surface of the deformed specimens with a sphere.

**Keywords:** *polylactic acid, thermoforming, pneumatic deformability test, Burgers model.*

### Összefoglalás

Jelen tanulmányban egy olyan mérési eljárás fejlesztését tűztük ki célul, amely alkalmas a melegalakítási folyamatok modellezésére, és egy olyan mutatószámot szolgáltat, amely kiválóan jellemzi egy fólia vagy lemez melegalakíthatóságát adott hőmérsékleten, adott nyomásviszonyok mellett. Erre a célra az emelt hőmérsékletű, pneumatikus vizsgálatot tartottuk a leginkább alkalmasnak. A vizsgálat a fólia szakadásig történő fújását jelenti, ami mindössze néhány másodpercig tart. A vizsgálatról készült képfelvétel-sorozatok elemzésével határoztuk meg az emelkedési magasságot ( $k$ ), valamint az alakváltozott próbatesteket, egy gömbbel közelítve a becsült felszínt.

**Kulcsszavak:** *politejsav, melegalakítás, pneumatikus alakíthatósági vizsgálat, Burgers-modell.*

### 1. Bevezetés

A modern környezetvédelmi törekvések miatt egyre inkább teret hódítanak a természetes alapú polimerek. Ezek közül kiemelkedik a felhasznált mennyisége és mechanikai tulajdonságai révén a politejsav (PLA) [1-3].

A 21. században rendkívüli mértékben megnövekedő árumozgások magukkal vonták a csomagolóipar robbanásszerű fejlődését, ami miatt előtérbe kerültek a melegalakítási eljárások [4-7].

A legtöbb polimerfeldolgozási eljárás esetén rendelkezésre állnak olyan mutatószámok, amelyek alapján közvetlenül meghatározható egy alapanyag feldolgozhatósága. Ezzel szemben a vákuum- és prés légformázáshoz nem kapcsolódóan ilyen mutatók. Nincs olyan egyszerű jellemző, amely közvetlen információt szolgáltat egy fólia vagy lemez melegalakítási eljárásokkal történő feldolgozhatóságáról. Jelen tanulmány célja egy ilyen mutatószám pontos meghatározására alkalmas mérési eljárás fejlesztése. Korábban vol-

tak már kísérletek a melegalakítás modellezésére emelt hőmérsékletű, golyós repesztéssel, amelyek ugyan pontos erőelmozdulás görbét adtak, de mégsem szolgáltak egyértelmű mutatószámmal. E vizsgálat dinamikai viszonyai is messze elmaradtak a melegalakítás gyakorlati sebességétől. Az emelt hőmérsékletű, pneumatikus anyagvizsgálat könnyen követhetővé teszi a nagyobb sebességű alakváltozásokat [5–7].

Ennek a módszernek a dinamikai viszonyai sokkal közelebb állnak a melegalakítás gyakorlatához. A tanulmány célja ezen módszer alkalmazhatóságának feltárása.

## 2. Felhasznált anyagok

A vizsgált fóliát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Polimertechnika Tanszékén Labtech Engineering Co., Ltd. LCR 300 típusú berendezéssel gyártottuk le. Az alapanyag NatureWorks LLC Ingeo Biopolymer 2003D típusú PLA-granulátum volt. Az egycsigás extruder csigájának fordulatszáma 54 1/min volt. A zónahőmérsékletek az elsőtől a szerszám felé 165-165-170-175-180 °C voltak. A széles résű szerszám hőmérséklete 180 °C volt. Az elhúzási sebesség 1 m/min volt. A temperáló henger sebessége 0,6 m/min volt, hőmérséklete 60 °C. A gyártott fólia 500 µm névleges vastagságú. Üvegesedési hőmérséklete 55 °C.

## 3. Mérési módszer

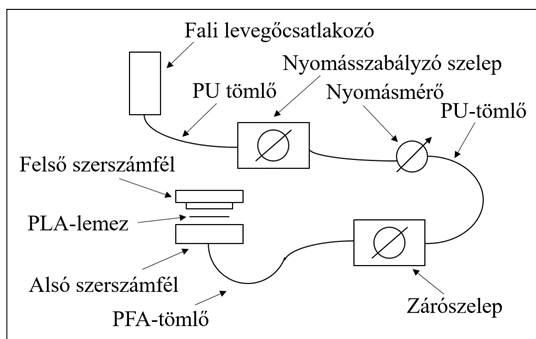
### 3.1. Mérőberendezés

A berendezés fő része az AlMgSi 6061-es ötvözetből készült szerszám (1. ábra). A szerszám két félből áll, amelyek közé helyezük a vizsgálni kívánt lemezt, fóliát. Az alsó szerszámfél tartalmaz egy tömítéshornyot, ahova egy O gyűrű kerül, valamint egy, a sűrített levegő bevezetésére szolgáló furatot. A felső szerszámfél cserélhető. Egy kisebb és egy nagyobb nyílású, mérő szerszámféllel is használható. A kisebb szerszámfél nyílása 79,8 mm furatátmérőjű, a nagyobb szerszámfél pedig 112,8 mm átmérőjű nyílással van ellátva. A mérések során a 79,8 mm átmérőjű szerszámfelet (Dsz) használtuk. Ennek az oka, hogy a nagyobb átmérőjű szerszámfélből hajlamos kicsúszni a próbatest a vizsgálat során. A két szerszámfél egymáshoz 4 db M8×18-as furattal és 4 db M8-as csavarral kapcsolódik.

A berendezés a fali sűrített levegő-hálózatra csatlakozik, ami jelen esetben 9 bar nyomású hálózatot jelentett. A sűrített levegő egy 8 mm külső átmérőjű, poliuretán (PU) anyagú pneumatikai



1. ábra. A pneumatikus alakíthatóságvizsgáló berendezés szerzsáma



2. ábra. A mérőberendezés sematikus felépítése

csövön keresztül érkezik egy nyomásszabályzó szelepbe. A nyomásszabályzó szelep után egy nyomásmérő egység van beépítve, és ezután egy zárószelep. A zárószelep után a szerszámba egy 8 mm külső átmérőjű cső vezet, amely a szerszámba G 1/4"-es idommal csatlakozik. A berendezés sematikus felépítése a 2. ábrán látható.

### 3.2. A mérés menete

A mérések elvégzéséhez a pneumatikus, alakíthatósági berendezést Zwick Z250 univerzális szaktógép hőkamrájába helyeztük meghatározott hőfokon 15 percre, majd a hőkamra ajtaját kinyitva, Nikon D3200 fényképezőgéppel filmfelvételt készítve, az adott nyomáson vizsgáltuk a fóliák viselkedését. E mérések során a fóliák tönkremeneteli magassága, tönkremenetelük módja és a kialakult „buborék” szimmetriája volt az elsődlegesen megállapítani kívánt jellemző.

A mérés elrendezése a következő volt. A pneumatikus alakíthatósági berendezés a hőkamra alsó felén volt elhelyezve, így a szerszám felső lapja 800 mm magasságban volt. A fényképezőgép háromlábú állványon volt rögzítve. A fényképezőgép a szerszám felső lapjának síkja felett 50 mm-rel magasabban, 850 mm magasságban volt elhelyezve, a szerszám középsíkjától 700 mm távolságban. A szerszám mögé 40 mm-re egy mérőskála került, amelynek nullpontja a fóliafúvó szerszámon belüli síkjával volt egy vonalban. A **3. ábra** egy mérési folyamat egyik képkockáját mutatja. A videofelvételek másodpercenként 25 képkockát tartalmaznak. A fóliák tönkremenetelének megállapításához az első repedés megjelenése előtti képet vagy azt a képkockát vettük, ahol a tönkremenetelt okozó „kidudorodás” először megjelent.

Mivel a próbatest és a mérőskála két külön síkban helyezkedik el, ezért a képekről leolvasott értékeket korrigálni kell. A korrekciós értéket az (1) összefüggéssel számoltuk ki.

$$\tan \beta = \frac{Y_1 - 50}{X_1} = \frac{Y^*}{X_2} \quad (1)$$

Az (1) összefüggés átrendezésével kapjuk a (2) összefüggést.

$$Y^* = \frac{X_2 \cdot (Y_1 - 50)}{X_1} \quad (2)$$

Jelen esetben  $X_2 = 140$  mm és  $X_1 = 740$  mm.  $Y_1$  a leolvasott értéket jelöli,  $Y^*$  pedig a leolvasott magasság torzított részét. Így a kapott korrekciós összefüggés a (3) összefüggés:

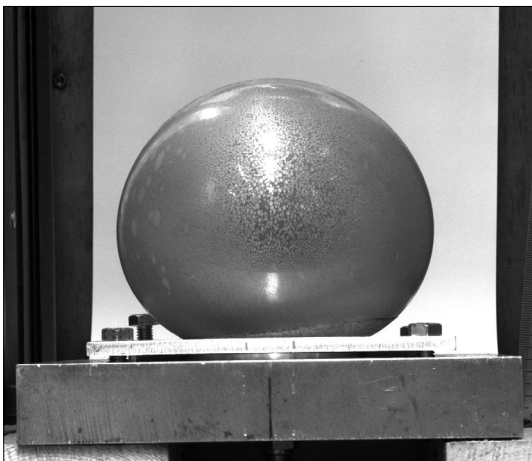
$$Y_m = Y_1 - 0,16667 \cdot (Y_1 - 50), \quad (3)$$

ahol  $Y_m$  a „buborék” valós magassága. A torzításhoz használt geometriai modell a **4. ábrán** látható.

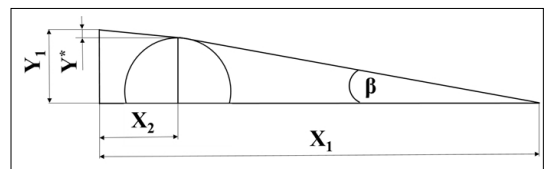
A mérések során a minta a pneumatikus alakíthatósági berendezés alsó és felső szerszámfele közé volt rögzítve, majd a hőkamrában az adott hőmérsékleten 15 percet tartózkodott; ennyi idő alatt a próbadarab hőmérséklete megfelelően megközelíti a hőkamra hőmérsékletét.

#### 4. Mérési eredmények

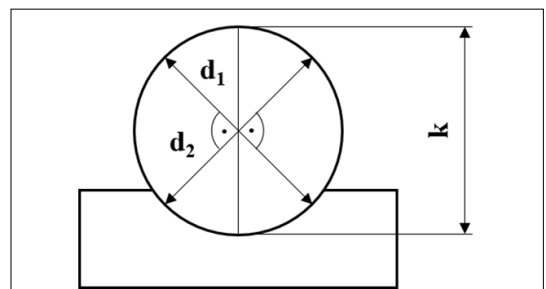
A próbatesteket 90 °C-ra temperált hőkamrába helyeztük. Mérések előtt a célunk a fólia tönkremeneteli magasságának megállapítása volt. A mérések során azonban azt tapasztaltuk, hogy egy próbatest kivételével, 1 bar nyomás hatására a fólia nem szenvedett tönkremenetelt okozó alakváltozást. Az 1 bar nyomás hatására elszenvedett alakváltozás mértéke azonban így is hasznos információval szolgálhat. A kialakult buborékot körrel közelítettük, amelynek szimmetriáját a buborék középvonalával  $\pm 450$ -ot bezáró két átmérő hányadosával jellemeztük. A szimmetria jellemzésére használt vonalak 450-os elhelyezése a középvonalhoz képest a szerszám okozta torzulást hivatott kiküszöbölni. Ez az arányszám 1 körüli érték esetén mutat nagyfokú szimmetriát. A méretek elhelyezkedését az **5. ábra** mutatja. A  $d_1$  és  $d_2$  meghatározásához a nyílt forráskódú GIMP képszerkesztő programot használtuk. A felvételek háttérében lévő méretek sálya segítségével két osztás közt található pixelek számát osztottuk



**3. ábra.** Egy mérési folyamat egyik képkockája a PLA 2003D fóliából fújt buborékról, a tönkremenetel előtt



**4. ábra.** A geometriai modell



**5. ábra.** A méretek elhelyezkedése



el a két osztás közti távolság korrigált értékével. Majd a szerszám középvonalán, a buborék felső vonalától lefele kijelöltük a  $k$  érték feléhez eső pontot. Abból a pontból kiindulva leolvastuk a  $d_1$  és  $d_2$  átmérők közti pixelek számát. A pixelek számát pedig megszoroztuk a méretskála osztásai közé eső pixelekre adódott távolsággértékkel. Az **1. és 2. táblázat** magasság oszlopában már a korrekció utáni érték szerepel.

Az 1 bar-on végzett mérések eredményét az **1. táblázat** tartalmazza.

Az adatokból látszik, hogy a fólia alakítási határa 15 perc, 90 °C-on való tartás után 1 bar hatására kicsivel 120 mm fölött van. A 2 bar-on végzett mérések eredménye a **2. táblázat**ban található.

A két különböző nyomásértéken végzett mérések alapján az 500  $\mu\text{m}$  vastagságú 2003D PLA-fóliáról elmondható, hogy a mérés során kialakult buborék jó közelítéssel szimmetrikus.

Az alakításról készült videók esélyt adtak a fóliák megnyúlásának időbeli lefutásának vizsgálatára. A buborékképződés vizsgálatához a videó képsorozatából elemzett képek mintavételezési gyakoriságát annak függvényében választottuk meg, hogy milyen gyorsan zajlott le az alakítás. Az elemzett képek mintavételezési gyakoriságát úgy választottuk meg, hogy a kapott görbék jelle-

ge megfeleljen a buborékképződés folyamatának. A PLA 2003D fólia 1 bar-os nyomással végzett alakításának vizsgálata során minden tizedik képkocka szolgált az alakváltozási méretek meghatározására. Ez 25 kép per másodperc esetén 0,4 másodpercenkénti mintavételt jelent. Az emelkedési magasság növekedésének időbeli változását az adatok kinyerése után emelkedési magasság-idő diagramban ábrázoltuk (**6. ábra**).

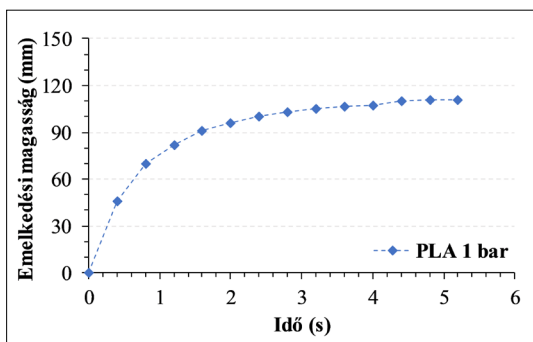
Az emelkedési magasság a kezdeti gyors növekedés után logaritmusos függvényalakot mutat, majd lassan beáll egy konstans értékre. Ebben az esetben a kísérlet nem járt a fólia tönkremenetelével.

A PLA 2003D fólia 2 bar-os mérésének kiértékeléséhez minden negyedik képkockát használtuk fel. Ez 0,16 másodpercenkénti mintavételt jelent. A gyakoribb mintavételt az indokolta, hogy a PLA 2003D anyagú fólia 2 bar nyomás hatására körülbelül 3 s alatt ment tönkre. A diagram a **7. ábrán** látható.

A 2 bar-os görbét az 1 bar-os görbével összehasonlítva láthatjuk, hogy a 2 bar-os esetben az emelkedési magasság a kezdeti gyors alakváltozás után egy közel lineáris vonalat követ. Az 1 bar-on végzett mérésnél láthattuk, hogy az emelkedési magasság egy állandó értéken stabilizálódott, hiszen itt a mérés nem járt a buborék tönkremenetelével.

**1. táblázat.** A PLA 2003D fólia 1 bar-on végzett mérésének eredményei

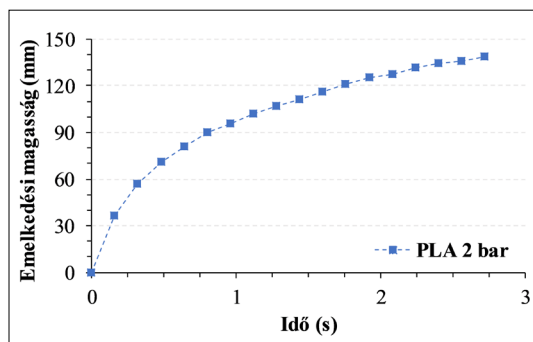
Minta	Magasság, k (mm)	Tönkremenetel	$d_1/d_2$
1.	124,99	igen	0,994
2.	120,83	nem	1,010
3.	119,17	nem	0,996
4.	104,33	nem	1,047
5.	103,33	nem	1,004



**6. ábra.** A PLA 2003D fólia 1 bar nyomással mért emelkedési magasság-idő diagramja

**2. táblázat.** A PLA 2003D fólia 2 bar-on végzett mérésének eredményei

Minta	Magasság, k (mm)	Tönkremenetel	$d_1/d_2$
1.	141,67	igen	1,013
2.	139,17	igen	1,010
3.	152,50	igen	0,979
4.	121,67	nem	0,968
5.	113,33	nem	1,025



**7. ábra.** A PLA 2003D fólia 2 bar nyomással felvett emelkedési magasság-idő diagramja

Az emelkedési magasság-idő diagramokból kísérletet tettünk egy, a fóliák alakváltozását leíró, a Burgers-moddal analóg modell paramétereinek megállapítására. A paraméterek megállapításához a diagram ordinátatengelyét át kell skálázni emelkedési magasságról felületmegnyúlás-értékekre. A fólia  $\varepsilon$  felületi megnyúlását az alakított fólia  $A_{sz}$  kezdeti területének (4) és az adott emelkedési magassághoz tartozó átmérőjű gömb  $A_b$  felületének (5) hányadosaként definiáltuk (6).

A felületi megnyúlás számításánál fontos megjegyezni, hogy ennek a modellnek az alkalmazhatóságát jelentősen korlátozza az, hogy a buborék felszínét gömbként modellezi, ami a szerszám okozta torzítások miatt jelentős elhanyagolásokat tartalmaz. A préslevegős formázás kezdeti szakaszán a fólia felülete paraboloid alakú, ennek az állapotnak a leírására a gömb felületének képlete nagyságrendi hibát eredményez, ezért a formázás során a felületnyúlást csak 50 mm emelkedési magasság felett értelmeztük. A mérés során készített képek alapján ez az a minimális magasság, amely felett a gömbfelületet már megfelelően közelíti a kialakuló buborék. A fóliák megnyúlásának felületen történő kétirányú vizsgálatát az indokolta, hogy a melegalakítási eljárások esetében az alakítószerszám felülete egy mérhető és fontos jellemzője a szerszámnak.

$$A_{sz} = \frac{D_{sz}^2 \cdot \pi}{4} \quad (4)$$

$$A_b = \frac{4 \cdot k^2 \cdot \pi}{4} \quad (5)$$

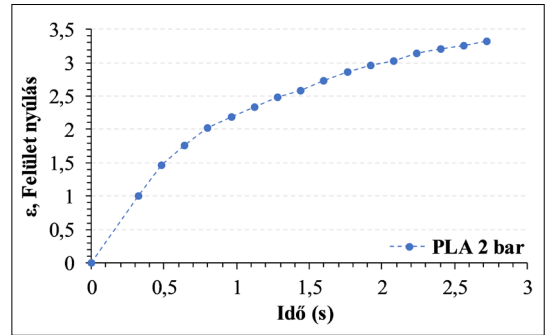
$$\varepsilon = \sqrt{\frac{A_b - A_{sz}}{A_{sz}}} \quad (6)$$

A Burgers-modell paramétereinek kiszámolásához meg kell állapítanunk egy kezdeti feszültségértéket ( $\sigma_B$ ) is. A feszültségérték megállapításához (9) a szerszámnyílás területén ( $A_{sz}$ ) ébredő F erő (8) osztottuk el a fóliának az alakítása kezdetén nyírófeszültségnek kitett keresztmetszetével ( $A_f$ ). Ez az alakítószerszám kerületének ( $D_{sz}$ ) és a fólia vastagságának ( $v$ ) a szorzatát jelenti (7).

$$A_f = D_{sz} \cdot \pi \cdot v \quad (7)$$

$$F = A_{sz} \cdot p \quad (8)$$

$$\sigma_B = \frac{F}{A_f} \quad (9)$$



8. ábra. A PLA-fólia 2 bar-on végzett méréséből előállított felületi nyúlás-idő diagram

Az átskálázott felületi nyúlás görbéből és a kiszámított feszültségértékből megkezdhetjük a modellparaméterek számítását. A modell paramétereinek számítását a felületi nyúlás-idő diagramokból szerkesztettük ki.

Az egyik PLA 2003D próbatest 2 bar-os vizsgálatának felületi alakváltozásra átskálázott választógörbéjét a 8. ábrán láthatjuk.

A paraméterek meghatározásakor a pillanatnyi rugalmas alakváltozási komponenst elhanyagoltuk. Az anyag nagyrugalmas állapotában is képes pillanatnyi rugalmas alakváltozásra, ám ez az alakváltozás a többi komponens mellett elhanyagolható. Ebből következően az  $E_1$  paraméter kiesik.

A PLA 2003D fóliára 2 bar-os terhelésből számolt modellünk egyenlete (10):

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_B}{12,997} \cdot t + \frac{\sigma_B}{4,836} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{1,547 \cdot t}{4,836}} \right) \quad (10)$$

A modellünk felállításának célja az volt, hogy a modell alapján más terhelésre ( $\sigma$ ) is kiszámíthatóvá váljon a várható felületi nyúlás ( $\varepsilon_0$ ) értéke az idő függvényében ( $t$ ). A 2 bar-os próbatesttel meghatározott modell pontosságát egy 1 bar-os próbatest alakítási adatait felhasználva ellenőriztük. Az 1 bar-on tesztelt próbatest alakítása,  $t = 5,2$  s-ig tartott. A fóliában 1 bar hatására ébredő feszültség,  $\sigma_B = 3,98$  MPa. Ezeket az értékeket a modellbe visszahelyettesítve, a modell alapján kiszámolt felületi megnyúlás értéke:  $\varepsilon_0 = 2,27$ . Ezzel szemben a fólia mért megnyúlása:  $\varepsilon_t = 2,77$  volt.

## 5. Következtetések

A munkánk során sikerült bebizonyítanunk, hogy az emelt hőmérsékletű pneumatikus vizsgálat alkalmas a melegalakítási folyamatok modellezésére. Meghatároztunk egy egyszerű mutató-

számot, az emelkedési magasságot ( $k$ ), amelynek maximális értéke kiválóan jellemzi egy fólia vagy lemez megalakíthatóságát adott hőmérsékleten, adott nyomáson. Ez az egyszerű mutatószám segít meghatározni a maximális alakváltozási képességet jó közelítéssel egyenletes biaxiális terhelés mellett. Eredményeinket validálja, hogy az emelkedési magasságból számolt megnyúlásokat az idő függvényében ábrázolhatjuk, és az így kapott görbére kiválóan illeszkedik a Burgers-modell. A kutatások folytatása során szükséges az egyes elhanyagolások hatásának feltárása, úgymint a gömbbel való geometriai közelítés, vagy a falvastagság-változás eloszlása az idő függvényében.

### Köszönetnyilvánítás

A kutatást az „Értéknövelt, multifunkcionális biopolimer csomagolási rendszer kifejlesztése és gyártástechnológiájának megtervezése” című, NVKP\_16-1-2016-0012 azonosító számú projekt támogatta. Gere Dániel köszönetét fejezi ki az Innovációs és Technológiai Minisztérium Kooperatív Doktori Programjának. A mérések elvégzésében nyújtott segítségéért köszönet illeti Dénes András alapszakos hallgatót.

### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Gere D., Czigany T.: *Future trends of plastic bottle recycling: Compatibilization of PET and PLA*. Polymer Testing, 81. (2020) 106160. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106160>
- [2] Józó M., Cui L., Bocz K., Pukánszky B.: *Processing induced segregation in PLA/TPS blends: Factors and consequences*. eXPRESS Polymer Letters, 14/8. (2020) 768–779. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2020.63>
- [3] Singh S., Santana-Pérez O., Rodriguez C., Oksman K., MasPOCH M. L.: *Mechanical behaviour of poly(lactic acid)/cellulose nanocrystal nanocomposites: A comparative study between conventional tensile test and small punch test*. eXPRESS Polymer Letters, 14/12. (2020) 1127–1136. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2020.92>
- [4] Hajba S., Tábi T.: *Cross effect of natural rubber and annealing on the properties of poly(lactic acid)*. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 63/4. (2019) 270–277. <https://doi.org/10.3311/PPme.12825>
- [5] Pölöskei K., Csézi G., Hajba S., Tábi T.: *Investigation of the thermoformability of various D-Lactide content poly(lactic acid) films by ball burst test*. Polymer Engineering and Science, 60. (2020) 1266–1277. <https://doi.org/10.1002/pen.25378>
- [6] Schwarzmann P., Illig: *Thermoforming*. 2. kiadás. Carl Hanser Verlag, München, 2019. 1–495.
- [7] Ashter A.: *Thermoforming of single and multilayer laminates. Plastic films technologies, testing, and applications*. 1. kiadás. Elsevier, Oxford, 2014. 1–352.



# Csővel körülölelt, fémhabalapú kompozitok gyártása, hőkezelése és vizsgálata

## Manufacturing, Heat Treatment and Investigation of Foam-Filled Tubes

Kincses Domonkos Balázs,<sup>1,2,a</sup> Kemény Alexandra,<sup>1,2,b</sup> Leveles Borbála,<sup>1,2,c</sup>  
 Károly Dóra<sup>1,2,d</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország

<sup>2</sup> MTA-BME Lendület Kompozit Fémhabok Kutatócsoport, Budapest, Magyarország

<sup>a</sup> kincsesd@edu.bme.hu, <sup>b</sup> alexa@eik.bme.hu, <sup>c</sup> borbala.leveles@edu.bme.hu, <sup>d</sup> kdora@eik.bme.hu

### Abstract

Composite metal foams are hybrid structures with the main advantages of high specific strength and mechanical energy absorption associated with low density. In the course of our research, we successfully manufactured functional metal foams of EN AC-44200 matrix filled with lightweight expanded clay aggregate particles (LECAPs) in EN AW-6060 alloy tubes with a diameter of 50 mm and a wall thickness of 5 mm. Manufacturing was performed by low-pressure infiltration directly into the aluminium tube. Six different types of samples were examined: metal matrix syntactic foam, in-situ metal foam, ex-situ metal foam, and their heat-treated pairs. In the compression tests, the heat treatment provided a visible improvement in the results of the ex-situ metal foams.

**Keywords:** *functional metal foam, microstructural analysis, LECAP, heat treatment.*

### Összefoglalás

A fémhabalapú kompozitok olyan hibrid szerkezetek, amelyek legfontosabb előnyei a kis sűrűség mellé tartó nagy fajlagos szilárdság és a mechanikaienergia-elnyelő képesség. Kutatásunk során EN AW-6060 anyagú, 50 mm átmérőjű és 5 mm falvastagságú csőbe helyezett, duzzasztott agyagkavics cellaképző ágyazatot infiltráltunk EN AC-44200 olvadékkal, így állítva elő szintaktikusfémhab-alapú kompozitot. A fémhabalapú kompozit gyártását kisnyomású infiltrálással végeztük az alumíniumcső nyomás alá helyezésével. Hat különböző mintát vizsgáltunk: szintaktikus fémhabot, csőben infiltrált, illetve utólag csőbe sajtolt, előtte adott méretűre esztergált szintaktikus fémhab tömböt, valamint ezek hőkezelésen átesett párját. A zömítővizsgálatok eredményei alapján a hőkezelés jól látható javulást hozott a fémhabalapú kompozitok nyomó igénybevétellel szembeni ellenállásában.

**Kulcsszavak:** *fémhabalapú kompozitok, mikroszerkezeti vizsgálatok, duzzasztott agyagkavics, hőkezelés.*

## 1. Bevezetés

Szerkezeti anyagként a fémhabalapú kompozitok gyárthatósága, szilárdsága és tönkremeneteli folyamatának ismerete különösen fontos a tervezhetőség biztosítása érdekében [1–3]. Kutatási munkánk fő céljai különböző, szintaktikus fém-

habbal kitöltött csövek gyártása és fejlesztése, valamint a mechanikai tulajdonságok feltérképezése kvázistatikus zömítővizsgálatokkal. A fentiek teljesítéséhez és megértéséhez mikroszerkezeti és mechanikai anyagvizsgálatokat végeztünk.

A szintaktikus fémhabokat általában önmagukban állítják elő, nem funkcionális szerkezeti

elemekként. A közelmúltban folytak kutatások a fémhabokkal kitöltött csövekről, amelyek többnyire vékony falú csövekbe sajtolt alumíniummátrixú, fémhabalapú kompozitokat tárgyalnak [4–8], de akadnak olyanok is, ahol vékony falú alumíniumcsövet tartalmazó fémhabalapú kompozitokat gyártottak [9], valamint porkohászati úton, habosítási technikával csőben előállított fémhabalapú kompozitokról szóló cikkek is megtalálhatók [10].

## 2. Anyagok és módszerek

### 2.1. Felhasznált anyagok

Kutatásunk során EN AC-44200 mátrixú szintaktikus fémhabokkal töltöttünk ki EN AW-6060 ötvözetű csöveket. Töltőanyagként a Liapor GmbH & Co. KG által forgalmazott duzzasztott agyagkavics- (LECA-) részecskéket alkalmaztunk, amely kémiai összetétele szerint főként  $\text{SiO}_2$ -,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - és  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -oxidokat tartalmaz. A részecskék belső szerkezete adja az előállított fémhab porozitását.

### 2.2. Vizsgálati próbatetek gyártása

A vizsgálatokhoz 6 különböző típusú mintát készítettünk elő: egy lépésben, közvetlenül a csőbe infiltrálással előállított (továbbiakban in-situ) és csőbe sajtolt (továbbiakban ex-situ) fémhabalapú kompozitokat, fémhabokat önmagukban, valamint ezek hőkezelésen átesett párjait (1. táblázat).

Az in-situ fémhabalapú kompozitokat kisnyomású infiltrálással állítottuk elő, ahol az olvadt mátrixanyagot közvetlenül öntöttük a LECA-részecskékkel töltött EN AW-6060 csőbe. Az infiltrációs paramétereket gondosan be kell állítani, mivel az olvadék átolvaszthatja a más összetételű alumíniumcső falát.

Az öntéshez először a töltőanyag-részecskéket készítettük elő:  $\varnothing 3,5$ – $4$  mm átlagos átmérőjű LECA-részecskéket helyeztünk véletlen szoros elrendezésben az előzetesen az alján lehegesztett  $\varnothing 50$  mm külső és  $\varnothing 40$  mm belső átmérőjű alumíniumötvözet (EN AW-6060) csövekbe. A cső lezárt aljára furatot helyeztünk a gázkivezetés érdekében, és egy rozsdamentes acélhálóval leszorított  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -paplannal tömtük ki, hogy megakadályozzuk az olvadék átfolyását. A részecskék tetejére szintén

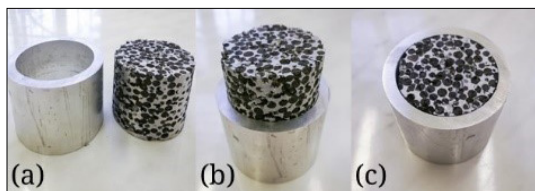
rozsdamentes acélhálót helyeztünk, azok elmozdulásának és az olvadékban történő felúszásának megakadályozása érdekében.

A részecskékkel megtöltött csöveket kemencében 45 percig  $530$  °C-on előhevítettük. Az EN AC-44200 ötvözetet indukciós olvasztókemencében hevítettük izzó állapotig. Miután elérte a kis viszkozitású olvadékállapotot, az olvasztókemencét kikapcsoltuk, és hűlés közben az olvadék hőmérsékletét digitális hőmérővel ellenőriztük. Az EN AW-6060 ötvözet olvadáspontja valamivel nagyobb ( $650$  °C), mint az EN AC-44200 ötvözeté ( $585$  °C), ezért az olvadék a csőbe helyezett részecskék közé infiltrálható anélkül, hogy a csőfalon átolvadna. Amikor az olvadék hőmérséklete elérte a  $650$  °C-ot, elkezdtük a csőbe önteni, és egy szigetelt pipán keresztül ráadtuk az infiltrálásához szükséges gáznymást ( $350$  kPa, argon). Lehűlés után a mintákat  $40$  mm-es magasságú darabokra vágtuk a zömítővizsgálatokhoz, amely minták sűrűségét is megmértük.

A szintaktikus fémhabokat hasonlóan gyártottuk, mint a habbal kitöltött csöveket, de alumíniumcső helyett egy acél zártszelvényt használtunk, és a mintákat kimunkáltuk  $\varnothing 40 \times 40$  mm méretű hengerekre. A csőbe sajtolt fémhabtömb mint kompozit előállításához szintén a kimunkált szintaktikusfémhab-darabokat helyeztük az üres csövekbe szoros illesztéssel (1. ábra).

Az alumíniumötvözetek szilárdságának növelése érdekében hőkezelést végeztünk a minták egy részén, mivel a cső alapanyaga EN AW-6060, amely kiválóan keményíthető ötvözet.

A hőkezelés során első lépésben oldatba visztük az ötvözt, majd a kiválást vízben történő gyorsítással megakadályozzuk. Az öregítés során a vegyület fázis a túltelített szilárd oldatból nagyon diszperz formában válik ki, és hatékonyan növeli a szilárdságot. A hőkezelés lépéseit a következőkben határoztuk meg: hevítés  $300$  °C/óra sebességgel, majd hűtés  $500$  °C-on  $2$  órán át. Ezt követően gyorsítás vízben. Utána hevítés  $200$  °C/óra sebességgel és hűtés  $200$  °C-on  $3$  órán át. Végül gyorsított vízben.



1. ábra. (a) Kimunkált fémhabtömb és üres cső, (b, c) fémhabtömb csőbe sajtolása

1. táblázat. Vizsgált próbatesttípusok darabszáma

	In-situ	Ex-situ	Fémhab
Nem hőkezelt (O)	3	2	3
Hőkezelt (T6)	3	2	1*

\*Az EN AC-44200 ötvözet nem kiválóan keményíthető

### 2.3. Mérési módszerek

A gyártott fémhabalapú kompozitok mikroszerkezeti vizsgálatára pásztázó elektronmikroszkopos (SEM) felvételeket készítettünk az előzetesen polírozott felületű mintákról.

Az **1. táblázat**ban jelölt mintákon vizsgálatokat végeztünk az ISO 13314:2011 szabvány alkalmazásával a mechanikai tulajdonságok értékelésére. A kvázi-statiszti zömítővizsgálatokat Instron 5989 univerzális, elektromechanikus anyagvizsgáló gépen végeztük 600 kN méréshatárú erőmérő cellával, illetve Zwick/Roell Z400RED univerzális anyagvizsgáló gépen 400 kN méréshatárú erőmérő cellával 4 mm/min keresztfejsébséggel. A súrlódás csökkentése érdekében 0,3 mm vastag, Kolofol márkájú teflonfóliát helyeztünk fel a próbatetek tetejére és aljára a szerszámlappal való érintkezésnél. Az összehasonlíthatóság érdekében minden próbatestet legalább 50% mérnöki alakváltozásig zömítettünk, és meghatároztuk a maximális nyomófeszültség ( $\sigma_c$ ) és elnyelt energia- (W50% a görbe alatti terület) értékeket 50% mérnöki alakváltozásig.

### 3. Eredmények

A SEM-képeken különböző méretű és eloszlású kiválások (fehér részek) vannak jelen mindkét anyagban. Megfigyelhető, hogy az ötvözetek (a cső és a mátrixanyag) között nincs hézag. A hőkezelt mintában a kiválások mindkét ötvözetben kisebb méretűek és sűrűbb eloszlásúak (**2. ábra**).

A nem hőkezelt próbatetek görbéit összehasonlítva a hőkezelt próbatetek görbéivel (**3. ábra**) látható, hogy a hőkezelés jelentős hatással volt az ex-situ fémhabalapú kompozitok tulajdonságaira. A görbecsoportok megközelítőleg 20% alakválto-

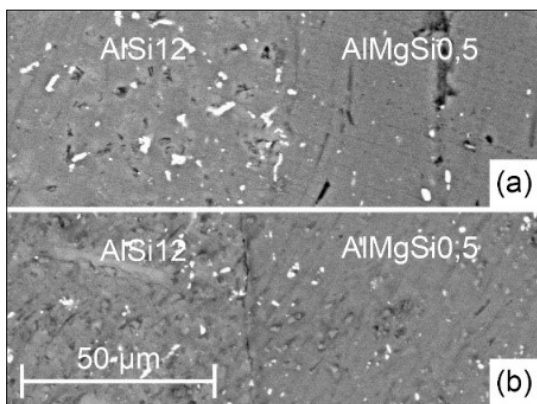
zásig együtt haladnak, majd ott kettéválnak. Megfigyelhető továbbá, hogy a hőkezelés nem volt hatással a szintaktikus fémhabok tulajdonságaira, ahogyan az várható volt.

Az is látható, hogy az in-situ fémhabalapú kompozitok tulajdonságait nem befolyásolta jelentősen a hőkezelési eljárás, kivéve egy próbatest tulajdonságait, ahol a kezdeti szakaszban a nyomóerő jelentősen meghaladta a nem hőkezelt in-situ fémhabalapú kompozitokhoz tartozó értékeket, görbéjének jellege pedig hasonlít az ex-situ hőkezelt kompozitokéra. Ennek egy lehetséges oka, hogy a többi hőkezelt próbatest hűtése nem volt megfelelően gyors, ami további vizsgálatokat igényel a későbbiekben.

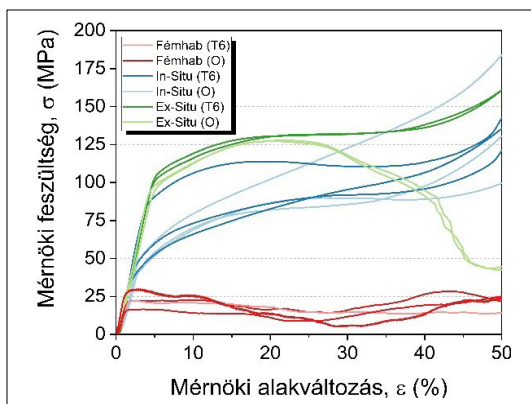
Míg az ex-situ fémhabalapú kompozitok mechanikai tulajdonságai (**2. táblázat**) javultak a hőkezelés hatására, addig ugyanez nem mondható el az in-situ kompozitokról, azonban a nem hőkezelt in-situ kompozitok nyomófeszültségének szórása igen nagy.

**2. táblázat.** A zömítővizsgálat eredményei próbatest-típusonként

	Nyomófeszültség $\sigma_c$ (MPa)	Elnyelt energia W50% (J/cm <sup>3</sup> )
Fémhab (O)	24,75±4,52	8,88±1,16
Fémhab (T6)	12,19	7,47
In-situ (O)	138,17±42,79	45,33±8,62
In-situ (T6)	133,09±10,99	46,13±6,25
Ex-situ (O)	127,45±0,43	49,09±0,61
Ex-situ (T6)	159,47±1,93	61,77±0,44



**2. ábra.** (a) SEM-felvétel a hőkezelés előtt (b) és a hőkezelést követően in-situ fémhabról



**3. ábra.** Az egyes próbatetek feszültség – alakváltozás görbéi

#### 4. Következtetések

A kutatásunk során kapott eredményekből az alábbi következtetésekre jutottunk:

- Az alumíniumcsőbe infiltrálással előállított (in-situ), alumíniummátrixú, fémhabalapú kompozit gyártása nemcsak hogy lehetséges, de egyszerű is és rendkívül olcsó.
- A hőkezelés alkalmazása indokolt, mivel:
  - Az ex-situ fémhabalapú kompozitok esetén nagyban javítja az anyag tulajdonságait, a cső nem törik darabokra nyomás hatására, és így jelentősen növekszik a kompozit fajlagos energiaelnyelése.
  - Megfelelő hőkezelés alkalmazása mellett az in-situ kompozitok megközelítik az ex-situ kompozitok értékeit, ami azért lényeges, mert az in-situ kompozitokat kevesebb lépésben, egyszerűbben és gyorsabban tudjuk legyártani.
- A SEM-felvételeken megfigyelhető, hogy szoros illeszkedés van a cső és a habtömb között, valamint a hőkezelés hatására finomabb kiválások jelentek meg, ami a zömítővizsgálatok eredményei alapján szilárdságnövekedést okoz. Ilyen szoros illeszkedést csőbe sajtolással nem lehet elérni.

#### Köszönetnyilvánítás

A publikáció az Innovációs és Technológiai Minisztérium NTP-SZKOLL-20-0067 kódszámú Nemzeti Tehetség Program pályázatának támogatásával valósult meg.

A kutatást támogatta az NKFIH Alap (TKP2020 IES, tsz: BME-IE-NAT; TKP2020 NC, tsz: BME-NCS) az Innovációs és Technológiai Minisztérium vezetése alatt.

Ezt a munkát részben az Országos Tudományos Kutatási Alap támogatta az OTKA FK\_21 138505 támogatási szerződés keretében

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Orbulov I. N., Szlancsik A.: *On the Mechanical Properties of Aluminum Matrix Syntactic Foams*. *Advanced Engineering Materials*, 170098. (2018). [doi.org/10.1002/adem.201700980](https://doi.org/10.1002/adem.201700980)
- [2] Szlancsik A., Katona B., Dombóvári Z., Orbulov I. N.: *On the effective Young's modulus of metal matrix syntactic foams*. *Materials Science and Technology*, 33. (2017) 2283–2289. [doi.org/10.1080/02670836.2017.1374497](https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1374497)
- [3] Katona B., Orbulov I. N.: *Structural damages in syntactic metal foams caused by monotone or cyclic compression*. *Periodica Polytechnica*, 61/2. (2017) 146–152. [doi.org/10.3311/PPme.10346](https://doi.org/10.3311/PPme.10346)
- [4] Yang X., An T., Wu Z., Zou T., Song H., Sha J., He C., Zhao N.: *The effect of outer tube on quasi-static compression behavior of aluminum foam-filled tubes*. *Composite Structures*, 245:112357. (2020) [doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112357](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112357)
- [5] Linul E., Movahedi N., Marsavina L.: *The temperature effect on the axial quasi-static compressive behavior of ex-situ aluminum foam-filled tubes*. *Composite Structures*, 180. (2017) 709–722. [doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.034](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.034)
- [6] Rajak D. K., Mahajan N. N., Linul E.: *Crashworthiness performance and microstructural characteristics of foam-filled thin-walled tubes under diverse strain rate*. *Journal of Alloys and Compounds*, 775. (2019) 675–689. [doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.160](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.160)
- [7] Zhang B., Wang L., Zhang J., Jiang Y., Wang W., Wu G.: *Deformation and energy absorption properties of cenosphere/aluminum syntactic foam-filled circular tubes under lateral quasi-static compression*. *International Journal of Mechanical Sciences*, 192:106126. (2021). [doi.org/10.1016/j.ijmeccsci.2020.106126](https://doi.org/10.1016/j.ijmeccsci.2020.106126)
- [8] Garai F., Béres G., Weltsch Z.: *Development of tubes filled with aluminium foams for lightweight vehicle manufacturing*. *Materials Science & Engineering A*, 790:139743. (2020) [doi.org/10.1016/j.msea.2020.139743](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139743)
- [9] Movahedi N., Murch G. E., Belova I. V., Fiedler T.: *Manufacturing and compressive properties of tube-filled metal syntactic foams*. *Journal of Alloys and Compounds*, 822:153465. (2020). [doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153465](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153465)
- [10] Duarte I., Vesenjanić M., Krstulović-Opara L., Ren Z.: *Static and dynamic axial crush performance of in-situ foam-filled tubes*. *Composite Structures*, 124. (2015) 128–139. [doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.01.014](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.01.014)

# Kísérleti fröccsöntő szerszám tervezése mikrostrukturált formaadó felületek vizsgálatához

## Design of an Experimental Injection Moulding Tool for Testing Microstructured Cavity Surfaces

Kun Krisztián

*Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország, kun.krisztian@gamf.uni-neumann.hu*

### Abstract

This research is based on the impact assessment of the active element of injection moulding tools. The quality of the tool surface has a significant effect on the filling and cooling efficiency. Our goal is to create a uniform structure on the cavity's surface that results in a high degree of orientation during the injection moulding process. A special experimental tool is needed for the research. Our design was based on the results of previous experimental research and preliminary criteria. The design was based on the size and position tolerances of the A side of the tool. As the previous study has shown, there are three main points to consider when designing an experimental moulding tool. These are the applied manufacturing technology, Design for Assembly, and the expansion of the measurement possibilities by using different sensors. The small beam size of the femtosecond laser also allows the machining of microscopic-sized details, a technology used to structure the cavity surface. The success of this was analyzed by microscopic examination.

**Keywords:** *surface structure, femtosecond laser, injection moulding, surface mapping, insert.*

### Összefoglalás

A kutatás a fröccsöntő szerszámok aktív elemének hatásvizsgálatára irányul. A szerszámfelület minősége jelentős hatással van a kitöltésre és a hűtés hatékonyságára. A formaadó felületen olyan egységes, strukturált felszín létrehozását végeztük, amely nagymértékű orientációt eredményez a fröccsöntési folyamat során. A kutatáshoz egy speciális kísérleti szerszámra volt szükség. Ennek tervezését egy korábbi kísérlet eredményeire és előzetes kritériumokra alapoztuk. A tervezés a szerszámban eredetileg is megtalálható álló oldali formabeté méret- és helyzetűréseit alapul véve történt. Ahogyan azt a korábbi vizsgálat is mutatta, három fő szempontot kellett figyelembe venni a szerszám tervezése kapcsán. Ezek az alkalmazott gyártástechnológia, a könnyen szerelhető konstrukció, illetve a mérési lehetőségek kibővítése különböző szenzorok alkalmazásával. A femtoszekundumos lézer kis sugármérete lehetőséget adott a mikrométerű részletek kimunkálására, amely eljárást a formaadó felület strukturálására használtunk. Ennek sikerességét mikroszkópi vizsgálattal elemeztük.

**Kulcsszavak:** *felületszerkezet, femtoszekundumos lézer, fröccsöntés, leképezés, formaadó betét.*

### 1. Bevezetés

A fröccsöntési folyamat során a termék keresztmetszetét vizsgálva megállapítható, hogy az egyes szegmensekben eltérő mértékű molekulao-rientáció jön létre. Polimer ömledék izotermikus áramlása esetén a fal melletti rétegek sebessége a csatorna közepén áramlókéhoz képest kisebb

lesz a súrlódás következtében. Hosszú molekulájú anyagok áramlásánál azok nem állhatnak be az áramlási irányra merőlegesen, hanem a makromolekula párhuzamosan orientálódik az ömledékáramlással. A sebességprofilból adódik, hogy a fal melletti orientáció mértéke nagyobb, mint a csatorna közepén. A folyamat során burkolóhár-



tya fejlődik rá a szerszám falára, amely tovább hűl. Az ömledék állapotú és a már megszilárdult rétegek között nyíróhatás hozza létre a nyírt orientált réteget. A termék közepe felé haladva kevésbé orientált vagy orientálatlan rétegeket találunk. Ezek a zónák átmenetiek, nincs közöttük éles határ. Mivel a szerszámfelület minősége jelentős hatással van a kitöltésre és a hűtés hatékonyságára, azt feltételezhetjük, hogy az eltérő orientációval rendelkező rétegek aránya módosul, ezáltal megváltoznak a fröccsöntött termékek mechanikai tulajdonságai is. A mechanikai tulajdonságok vizsgálatára egy speciális kísérleti fröccsöntő szerszámot terveztünk [1, 2].

### 1.1. A forgácsolt felületű kísérleti fröccsöntő szerszám bemutatása

A kísérlet az aktív elemek vizsgálatára irányult, így a tervezés a szerszámban eredetileg is megtalálható álló oldali formabetéttel méret- és helyzet-tűréseit alapul véve történt. Két olyan, egymástól eltérő felületi mintázatot kívántunk létrehozni, amelyek nagymértékű orientációt eredményeznek a fröccsöntési folyamat során. Az ömledék folyásirányára merőleges, illetve azzal párhuzamos hornyot alakítottunk ki a szerszámbetét dolgozó felületének két oldalán. A hornyok tervezett mélysége 100  $\mu\text{m}$  (1. ábra) [3, 4, 7].

#### 1.1.1. A gyártási módszer kiválasztása

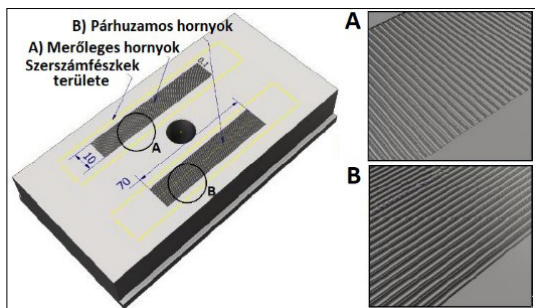
Alkalmazott gyártási eljárásként forgácsolást választottunk a mintázatok létrehozására. A forgácsolás 30°-os csúcshögű keményfém-gravírozó tüvel történt, amelynek 0,2 mm a csúcslekerékítése, továbbá TiN-bevonattal ellátott. A gravírozás során a pályák hossza miatt a szerszám fokozott kopásnak van kitéve. Típusa: SKU311611 (2. ábra) [3–5].

#### 1.1.2. A megmunkálás utáni vizsgálat

A geometriai peremfeltételek rögzítését követően legyártottuk a tervezett pályákat, majd azokat Mitutoyo QuickVision Elf Pro digitális mikroszkóp segítségével elemeztük. Az így kapott felvételeken jól kivehetők a kialakított hornyok makro- és mikrogeometriai jellemzői, például a hornyok szélessége és érdessége (3. ábra) [3, 4, 6].

#### 1.1.3. A betéten kialakított mintázat vizsgálata kontúrmérő berendezéssel

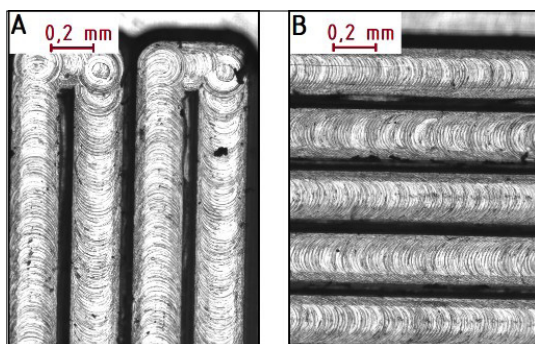
A párhuzamos és merőleges pályákat 3-3 részre osztva történt a kontúrmérés 3,5 mm-es vizsgálati hosszon. A szakaszokat a pálya kezdetén, közepén és végén vettük fel. Ennek segítségével a szerszámkopásból adódó magasságbeli eltérések kimutathatók voltak (4. ábra).



1. ábra. Az aktív elemre tervezett felületi mintázat [3]



2. ábra. Keményfém-gravírozó tű TiN-bevonattal [3]



3. ábra. A merőleges (A) és párhuzamos hornyok (B) mikroszkópi felvételei [3]



4. ábra. A kontúrmérés vizsgálati pontjainak elhelyezkedése a szerszámbetét felületén [3]

Már a mikroszkópi képeken is látható volt a különbség a gravírozott pályák között, amit a kontúrmérés is igazolt. A gravírozással létrehozott hornyoknál, geometriájukat tekintve szabályos rendezettség figyelhető meg, ezzel szemben a párhuzamos és merőleges pályák profiljai nem mutattak számottevő különbségeket. A szerszámkopás átlagos értéke 0,02 mm-re tehető. Az **5. ábrán** jól megfigyelhető, hogy a szerszám-pályák távolsága közelíti az előre programozott értéket (0,34 mm) [3, 4, 8].

#### 1.1.4. A kísérlet értékelése

Ahhoz, hogy a tervezett felületelemek nagyobb egyezőséget mutassanak, gondos technológiai és geometriai előtervezés szükséges. Jól szemléltették ezt a kontúrmérés eredményei is. Technológiai szempontból a forgácsolást fel kell váltani egy olyan eljárással, amely mindenhol egységes textúrát képes létrehozni. Emellett egy olyan szerszám megalkotása a cél, amelyen a mintázatok szerelhető betéteken keresztül rögzíthetők a formaüregre, ezzel megkönnyítve különböző mintázatok cseréjét, azok hatásának vizsgálatát. További cél, hogy a gyártás során a folyamatparaméterek diagnosztizálását hőmérséklet- és nyomá szenzorokkal nyomon tudjuk követni.

## 2. Kísérleti fröccsöntő szerszám tervezése

### 2.1. A tervezést befolyásoló tényezők

Ahogy a korábbi vizsgálat is mutatta, három fő szempontot kell figyelembe venni a szerszám tervezése kapcsán: az alkalmazott gyártási eljárást, a könnyű szerelhetőséget, illetve a mérési lehetőségek kibővítését különböző szenzorok alkalmazásával.

#### 2.1.1. Gyártás femtoszekundumos lézerrel

A lézeres anyagmegmunkálási eljárások közös jellemzője, hogy az eltávolított anyag mennyisége a technológia függvényében állandó, szemben a forgácsolásnál jelentkező szerszámkopással. A femtoszekundumos lézer kis sugármérete lehetőséget ad mikrométerű részletek kimunkálására is, valamint olyan rövid impulzusokat generál, amelyek nem hagynak termikus nyomokat a megmunkált alkatrészben (**6. ábra**). A megmunkált anyag az abláció során eróziós folyamaton megy keresztül. Jelen kutatásban célunk egy olyan egységes felület létrehozása, amely mindenhol azonos mélységű pályát tartalmaz. A gyártás során olyan lehetséges problémákra is nagy hangsúlyt

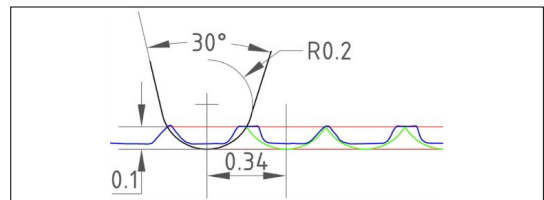
kell fektetni, mint a plazmaképződés és az oxidáció elkerülése, illetve a hőhatásövezet méretének minimalizálása [9, 10].

A rendelkezésünkre álló berendezés egy Monaco 1035-80-40 típusú ipari femtoszekundumos lézer (**7. ábra**), amely egy LINOS F-Theta-Ronar típusú szkenneroptikával van ellátva. A lézer 80  $\mu\text{J}$ /impulzus energia leadására képes 1035 nanométeres hullámhossz mellett. A maximálisan beállítható impulzushossz 277 fs [F].

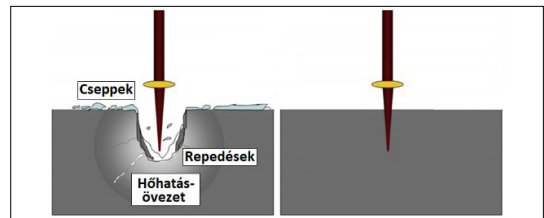
Az alkalmazott lézerberendezés pontos technikai jellemzőit az **1. táblázat** tartalmazza.

#### 1. táblázat. Monaco 1035-80-40 lézer paraméterei [11]

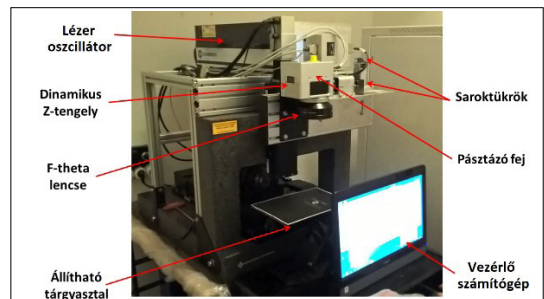
Átlagteljesítmény	40 W
Impulzusenergia	80 $\mu\text{J}$ (500 kHz-en)
Frekvenciatartomány	188 kHz – 50 MHz
Hullámhossz	1035 $\pm$ 5 nm
Impulzushossz	<350 fs
Módus	TEM00, M2 <1,2



**5. ábra.** A hornyok méreteinek változása: zöld színben a tervezett, kékkel a kialakult kontúr [3]



**6. ábra.** Hosszú impulzusú (balra) és rövid impulzusú lézerek (jobbra) hőhatásövezete [13]



**7. ábra.** A femtoszekundumos lézerberendezés

### 2.1.2. A szerszámbetétek texturált felületének kialakítása

Az új kísérleti szerszám esetében a texturált betétek a mozgó oldali szerszámfélben foglalnak helyet (8. ábra). A betétek rögzítéséért további két köszörült betét felel, amelyek csavarkötéssel kapcsolódnak a szerszámtesthez. A szerszám termeke két szabványos szakító próbatest, amelyek mechanikai vizsgálatokhoz alkalmazhatók.

A korábbi kutatásban két eltérő orientáltságú mintázatot hoztunk létre. A lézeres megmunkálásnak köszönhetően jó ismétlési pontossággal reprodukálhatjuk a különféle mintázatokat. A betét alapja  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$  felületi érdességre köszörült, M200 anyag jelű szerszámacél. A párhuzamos és merőleges minta mellett a továbbiakban célunk különféle raszterminták vizsgálata. A tervezett szerszám előnye, hogy a formalap két oldalán cserélhetők a különböző módon texturált betétek. A mechanikai vizsgálatok összehasonlító elemzéseihez készül továbbá egy  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$  érdességű köszörült felületű betét is. A betétek hasznos felülete  $78 \times 10 \text{ mm}$  (9. ábra).

### 2.1.3. Szenzorok

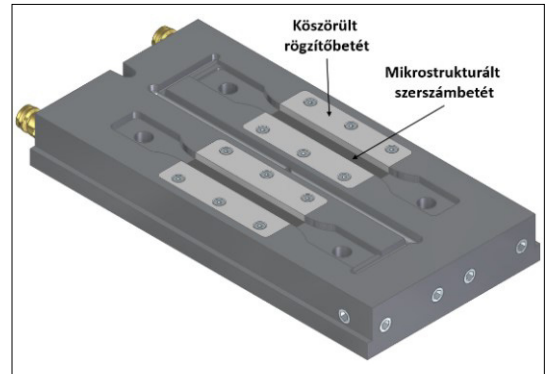
Az elektrozrezisztív elven működő nyomásmérő szenzor beszerelésére kétféle módszer létezik: direkt és indirekt módszer. A direkt módszer esetében a szenzor szoros illesztéssel rögzíthető közvetlenül a formaüreghez. A folyamatos előfeszítés, karbantartás és szerelés befolyásolja a mérési pontosságot. A kísérleti szerszámhoz alkalmazott indirekt beszerelésnél egy fordított csap kerül be a kidobó csap mögé laza illesztéssel, így adja át a nyomásból származó erőt. Előnye, hogy sem előfeszítést, sem karbantartást nem igényel a szerszám teljes élettartama alatt. Az egzaktabb vizsgálati eredményekhez az ömledék-hőmérséklet mérésére további szenzorok alkalmazása javasolt [12].

## 3. Eredmények

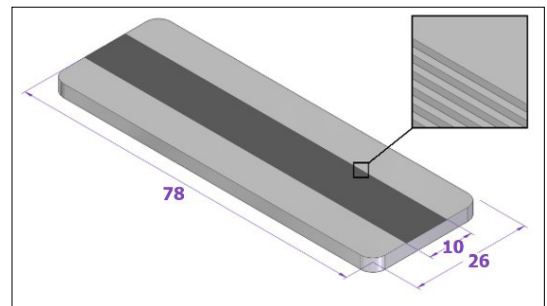
A tervezést követően a gyártott betéteken femtoszekundumos lézerral felületkezelést végeztünk, majd az így kapott mintázatot Mitutoyo QuickVision Elf Pro digitális mikroszkóppal vizsgáltuk. A hornyok tervezett méreteit a 10. ábra szemlélteti.

A lézeres felületkezelés során kialakult „V” profilú hornyok létrejöttek (11. ábra) több oka is lehet:

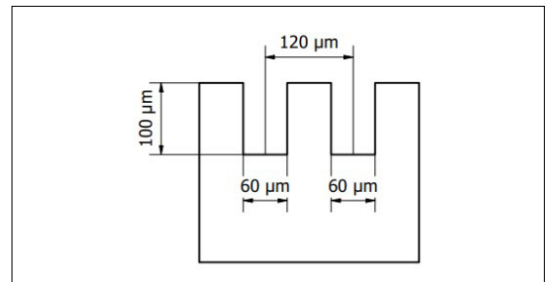
A lézernyaláb TEM00 módusú, emiatt a nyaláb intenzitáseloszlása Gauss-eloszlást követ. Esetünkben a nyaláb középső részén a legnagyobb



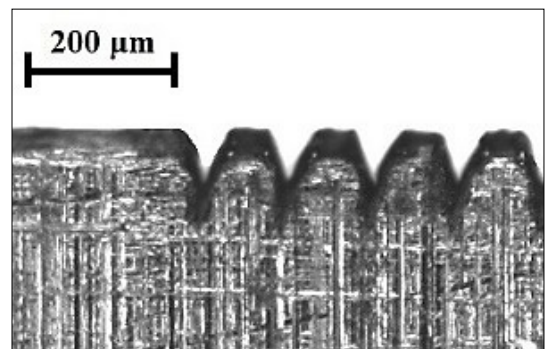
8. ábra. A tervezett kísérleti fröccsöntő szerszám



9. ábra. Párhuzamos hornyokkal ellátott szerszám betét

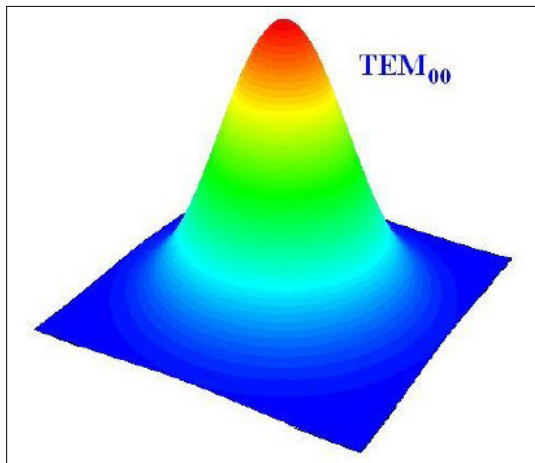


10. ábra. A hornyok tervezett méretei



11. ábra. A felületi mintázat mikroszkópi képe a hornyokra merőleges metszetben





12. ábra. Monaco 1035-80-40 lézer Gauss-eloszlású nyaláb energiaeloszlása [11]

az intenzitás, attól kifelé az fokozatosan csökken, amit a 12. ábra szemléltet.

A tervezett mélység kialakítása érdekében a struktúrák többszöri pásztázással készültek. A dinamikus fókuszállítás során először a felszínre fókuszáltunk, ami 60  $\mu\text{m}$  széles csatornát alakított ki. A fókuszeltolást követően a csatornaszélesség (60  $\mu\text{m}$ ) továbbra is állandó értékkel készült volna, viszont a nyaláb divergenciája miatt, a fókuszeltolástól pozitív irányban (a nyalábderek fölött) is elértük az ablációs határt, ami tovább szélesítette a csatornát.

A csatornán belüli szóródott sugárzás további anyagot távolíthat el a felülethez közelebbi rétegekből a többszöri pásztázás miatt.

#### 4. Következtetések

Polimer ömledék áramlása esetén a makromolekulák nem rendeződhetnek az áramlási irányra merőlegesen, hiszen így két végük különböző sebességgel mozognak. Ebből következik a makromolekuláknak az ömledékáram irányával párhuzamos orientációja. A súrlódás következtében a fal melletti rétegek sebessége kisebb. A sebességprofilból adódik, hogy a fal melletti párhuzamos orientáció mértéke nagyobb. A termék közepe felé haladva az orientáció párhuzamossága csökken. Korábbi kutatásokra alapozva, a fröccsöntés során a szerszám formaadó felületének felületi minősége hatással van a kitöltésre és a hűtés hatékonyságára. Ez a jelenség az eltérő orientációjú rétegek arányát módosíthatja, megváltoztatva a fröccsöntött termékek mechanikai tulajdonságait.

Jelen kutatás eredményeként megterveztünk egy speciális kísérleti fröccsöntő szerszámot,

melynek célja a molekulaorientáció nagymértékű befolyásolása a fröccsöntési folyamat során. Segítségével az előzetes vizsgálatok eredménye validálható, a kutatási terület tovább bővíthető. Az alkalmazott femtoszekundumos lézerrel egységes felületi struktúra alkotható.

#### Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Pantani R., Sorrentino A., Speranza V., Titomanlio G.: *Molecular orientation in injection molding: experiments and analysis*. Rheologica acta, 43/2. (2004) 109–118.  
<https://doi.org/10.1007/s00397-003-0325-8>
- [2] Pósa M., Belina K., Boza P.: *Amorf és kristályos polimerek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata*. Inter-Ing, Târgu Mureş, 2006. 69–72.
- [3] Kun K., Boza P., Weltsch Z.: *Polimer ömledék leképeződésének vizsgálata formáireg felületi struktúráin*. Gradus, 6/1. (2019) 192–198.
- [4] Kun K., Boza P.: *Investigation of inserts surface structures on injection moulded parts*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 448/1. (2018) 012052.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012052>
- [5] Fleischer J., Kotschenreuther J.: *The manufacturing of micro molds by conventional and energy-assisted processes*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33/1–2. (2007) 75–85.  
<https://doi.org/10.1007%2Fs00170-006-0596-1>
- [6] Holthusen A. K., Riemer O., Schütz J., Meier A.: *Mold machining and injection molding of diffractive microstructures*. Journal of Manufacturing Processes, 26. (2017) 290–294.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.014>
- [7] Theilade U. A., Hansen H. N.: *Surface microstructure replication in injection molding*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33/1. (2007) 157–166.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-006-0732-y>
- [8] Pósa M., Belina K., Boza P., Szűcs A.: *Examination of the effect of machining technology on the surface of injection moulding parts*. Inter-Ing, Târgu Mureş, 2005, 19–25.
- [9] Temmler A., Willenborg E., Wissenbach K.: *Design surfaces by laser remelting*. Physics Procedia, 12. (2011) 419–430.  
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.053>

- [10] Preußner J., Oeser S., Pfeiffer W., Temmler A., Willenborg E.: *Microstructure and residual stresses of laser structured surfaces*. In *Advanced Materials Research*, 996. (2014) 568–573.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.996.568>
- [11] Monaco: Industrial Femtosecond Laser adatlap  
<https://dokumen.tips/documents/monaco-1035-edge-1035-industrial-femtosecond-laser-monaco-1035-is-an-industrial.html>  
(letöltve: 2021. 02. 15.)
- [12] Cavity Eye: Szerszámnyomás mérés  
<http://cavityeye.com/froccsontes-technologia>  
(letöltve: 2021. 02. 15.)
- [13] J. Gergely: *Átlátszó PMMA megmunkálása femtoszekundumos lézerrel*. *Gradus*, 8/1. (2021) 219–226.  
<https://doi.org/10.47833/2021.1.ENG.001>

## Grafit- és grafénerősítésű sztírol-butadién kaucsuk fejlesztése

### Development of Graphite- and Graphene Reinforced Styrene-Butadiene Rubber

Pirityi Dávid Zoltán,<sup>1</sup> Pölöskei Kornél<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup> [pirityid@pt.bme.hu](mailto:pirityid@pt.bme.hu)

<sup>2</sup> [poloskei@pt.bme.hu](mailto:poloskei@pt.bme.hu)

#### Abstract

The environmental impact of rubber waste can be reduced by extending the lifetime of rubber products. It can be achieved by developing graphene/rubber nanocomposites with good abrasion resistance. In this paper, we investigated how rubber mixing technologies influence the mechanical properties of rubber. We added various amounts (0, 1, 5 and 10 phr) of graphite and graphene to rubber mixtures using a two-roll mill, an internal mixer, a single- and a twin-screw extruder. We performed tensile, tear strength and Shore A hardness tests on the vulcanisates and analysed their fracture surfaces with a scanning electron microscope. Our results show that graphene had a better reinforcing effect than graphite. Rubber mixing via extrusion may contribute to more severe polymer degradation, though their reproducibility is better than that achieved on a two-roll mill or in an internal mixer.

**Keywords:** *elastomer, graphite, graphene, nanocomposite.*

#### Összefoglalás

A gumihulladékok környezetterhelése csökkenthető a gumitermékek élettartamának növelésével. Ennek egyik kitüntetett kutatási iránya a grafénnal erősített, nagy kopásállóságú nanokompozitok fejlesztése. Kutatásunk során a keverékkészítés technológiájának a gumi mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását vizsgáltuk. Munkánk során 0, 1, 5 és 10 phr mennyiségben adalékoltunk grafitot és grafént gumikeverékekhez hengersizéken, zártkeverőben, egycsigás és ikercsigás extruderben. Az elkészített mintákon keménységmérést, szakító-, továbbszakító és elektronmikroszkópi vizsgálatot végeztünk. Vizsgálati eredményeink rávilágítottak arra, hogy a grafén jelentősebb erősítő hatást fejtett ki a grafitnál. Az extrúziós eljárások a polimer láncmolekulák nagyobb mértékű tördelődését okozhatják, igaz, reprodukálhatóságuk jobb, mint a hengersizéken vagy a zártkeverőben végzett keverékkészítésé.

**Kulcsszavak:** *elasztomer, grafit, grafén, nanokompozit.*

#### 1. Bevezetés

A fejlődő környezetvédelmi normák egyre nagyobb nyomás alá helyezik az autóiipart, hogy gumihulladékaik minél kisebb környezeti terhelést okozzanak. E terhelés csökkentésének két fő módját kutatják intenzíven: a) az anyagában történő

újrahasznosítást (pl.: devulkanizálás [1, 2]) és b) az élettartam-növelést [3, 4]. Utóbbi megvalósíthatóságát támogathatja egy újszerű fejlesztési irány, amely során grafén nanorészecskéket adnak az autógumik futófelületét alkotó gumikeverékekhez [5].

A grafén a szén egyik allotrop módosulata, amelynek felfedezéséért Novoszjolov és Geim 2010-ben elnyerte a fizikai Nobel-díjat. Fajlagos felülete kb. 2400 m<sup>2</sup>/g, ami már kis mennyiségben történő adagolás esetén is lehetővé teszi kiemelkedő erősítő hatás elérését polimermátrixú kompozitokban [6].

A gumik rendkívül komplex anyagszerkezete miatt fontos, hogy azokat mindig holisztikus módon értékeljük. Lehetetlen egy időben minden mechanikai tulajdonság javítása, így komoly eredménynek tekinthető az is, ha bizonyos tulajdonságok releváns mértékben javulnak, de közben más mechanikai tulajdonságok csak oly mértékben csökkennek, hogy a termék alkalmazhatóságát nem befolyásolják [5].

Ebben a kutatásban a grafit és a grafén gumiiipari alkalmazhatóságát és a keverékkészítés technológiájának hatásait vizsgáljuk.

## 2. Kísérleti rész

### 2.1. Felhasznált anyagok

A kutatás során sztirol-butadién kaucsuk (SBR) alapú keverékeket hoztunk létre, amelyek az autógumik futófelületét szimulálták. A gumikeverékek a következő alapanyagokat tartalmazták.

- SBR-kaucsuk: SKS-30 ARKPN SBR 1502 típusú, emulziós eljárással előállított SBR-kaucsuk (gyártó: Synthes Kauchuk JSC, Voronyezs, Oroszország);
- Korom: N330-as méretosztályú, amorf szén (gyártó: Kremenchug Carbon Black Plant, Kremencsuk, Ukrajna);
- Grafén (GR): xGnP Grade H típusú grafénrészecskék (gyártó: XG Sciences Inc., Lansing, Minnesota, USA);
- Grafit (G): C-Therm típusú, nagy fajlagos felületű, 1 mikron vastagságú grafitlemezek (gyártó: Imerys Graphite & Carbon, Bodio, Svájc).

A vulkanizálórendszer komponenseit, vagyis a cink-oxidot (ZnO), a sztearinsavat, az N-ciklohexil-2-benzotiazol-szulfenamidot (CBS), a tetrametil-tiurám-diszulfidot (TMTD) és a ként a Tauril Kft. szolgáltatta.

Az előkísérleteinkhez az 1. táblázatban bemutatott receptúrák alapján hoztunk létre kaucsukkeverékeket hengersizéken. Ennél a vizsgálati sornál az egycsigás extruder további keverőhatását vizsgáltuk 30 és 120 1/min csigafordulatszám mellett. Az így előállított minták elnevezései ebből adódtak. A minták jelöléseinek alsó indexében található „ee” az egycsigás extrudert, majd

az azt követő szám a csigafordulatszámot jelöli. A minták elnevezésének végén az esetleges grafit-tartalmat jelenítettük meg a 100 tömegegység kaucsuktartalomra vonatkoztatva (phr, parts per hundred rubber): SBR<sub>ee30</sub>, SBR<sub>ee120</sub>, SBR<sub>ee30\_GR1</sub>, SBR<sub>ee120\_GR1</sub>.

A fő kísérletek alapja egy 10 phr kormot és hatásos vulkanizálórendszert tartalmazó keverék, amelynek összetételét a 2. táblázat tartalmazza. Ezeket a keverékeket is hengersizéken hoztuk létre, majd ikercsigás extruder vagy zártkeverő segítségével tovább kevertük. Az így létrehozott minták elnevezései is így adódtak. A „k” betű a koromtartalomra utal, utána az alsó index „ie” vagy „b” jele az ikercsigás extruderre és a zártkeverőre. A minták elnevezésének végén az esetleges grafén- (GR) vagy grafit- (G) tartalmat jelöltük phr-ben: kSBR<sub>ie</sub>, kSBR<sub>ie\_GR1</sub>, kSBR<sub>ie\_GR5</sub>, kSBR<sub>ie\_GR10</sub>, kSBR<sub>ie\_G1</sub>, kSBR<sub>ie\_G5</sub>, kSBR<sub>ie\_G10</sub>, kSBR<sub>b</sub>, kSBR<sub>b\_GR1</sub>, kSBR<sub>b\_GR5</sub>, kSBR<sub>b\_GR10</sub>, kSBR<sub>b\_G1</sub>, kSBR<sub>b\_G5</sub> és kSBR<sub>b\_G10</sub>.

1. táblázat. Az előkísérletekhez felhasznált SBR-keverékek

Összetevő	phr
SBR	100
GR	0; 1
ZnO	5
Sztearinsav	1
CBS	1
TMDT	0,8
Kén	2

2. táblázat. A fő kísérletek gumireceptúrái

Összetevő	phr
SBR	100
N330	10
GR	0; 1; 5; 10
G	0; 1; 5; 10
ZnO	3,3
Sztearinsav	2
CBS	1,8
TMTD	1,8
Kén	1,7

## 2.2. Az alkalmazott eljárások

A keverékkészítés első lépését Labtech LRM-SC-110/T3E típusú hengerszéken végeztük. A mintákat 15 percig kevertük, a **3. táblázat**ban feltüntetett paramétereknek megfelelően.

Az előkísérletek során a hengerszéken előállított gumikeverékeket 10–20 mm széles csíkokra vágva adagoltuk egy Labtech LE 25-30/C típusú, egycsigás extruderbe. Az extrudálásra a grafén jobb elkeveredésére érdekében került sor. A homogenizálás minden előkísérleti minta esetében növekvő hőmérsékletprofil mellett valósult meg, az extruder behúzó szakaszát 80 °C-ra fűtöttük fel, a szerszámot 100 °C-ra.

A fő kísérletek során a hengerszékes keverést minden esetben ikercsigás extruderben vagy zártkeverőben történő keverés követte. Ehhez Labtech LTE 26-44 típusú, ikercsigás extrudert használtunk 60 1/min csigafordulatszámmal, növekvő hőmérsékletprofil mellett (80 °C az extruder behúzó szakaszánál, 100 °C a szerszámnál). Az extruder behúzó szakasza A zártkeverőben történő homogenizálás Brabender Plasti-Corder típusú gépen történt. A keveréshez tangenciális rotorokat használtunk 65 1/min fordulatszámmal. A keverő 50 cm<sup>3</sup>-es kamráját 70 °C-ra fűtöttük, majd 70%-ig töltöttük. A keverés addig tartott, amíg a kaucsukkeverék hőmérséklete elérte a 115 °C-t.

A homogenizálást követően a mintákat Collin Pressplate 200E típusú, hidraulikus présben vulkanizáltuk 160 °C-on, 2,7 MPa nyomáson,  $t_{90}$ -ig (90%-os vulkanizálási fokhoz tartozó ideig). A folyamat végén 2 mm vastag gumilapokat kaptunk. A gumilapokból golyós prés segítségével szakító- és továbbszakító próbatesteket vágunk ki.

## 2.3. Vizsgálati módszerek

A gumikeverékek vulkanizálási paramétereit MonTech D-RPA 3000 típusú vulkaméterrel határoztuk meg. A vizsgálat során a gép egy vulkanizálatlan kaucsukkeverék próbatestet melegít fel 160 °C-ra. Állandó 1,67 Hz-es frekvenciát és 1°-os amplitúdót alkalmazva, az oszcilláló nyíró igénybevétel során folyamatosan mértük a szükséges forgatónyomatékat. A forgatónyomaték a modulus változásának megfelelően változik, ebből lehet következtetni a keresztkötések kialakulására, vagyis a vulkanizálás előrehaladására.

A szakítóvizsgálatokat Zwick Z020 típusú szakítógéppel, az ISO 37:2017 szabvány [7] szerint végeztük 500 mm/min vizsgálati sebességgel, 60 mm-es befogási hosszról indítva. A továbbbszakító

## 3. táblázat. A nyerskeverékek készítése során alkalmazott hengerszék-paraméterek

	Fordulatszám (1/min)		Hőmérséklet (°C)		Rész-méret (mm)
	1.	2.	1.	2.	
<b>Henger:</b>					
0–5 perc	3	5	50	70	2
5–10 perc	5	8	50	70	0,75
10–15 perc	10	15	50	70	0,75

## 4. táblázat. Az előkísérletek szakítóvizsgálatának eredményei

Minta	Szakítószilárdság (MPa)	Szakadási nyúlás (%)
SBR <sub>ee30</sub>	1,65 ± 0,05	114,3 ± 7,0
SBR <sub>ee30_GR1</sub>	2,71 ± 0,12	181,9 ± 9,4
SBR <sub>ee120</sub>	2,08 ± 0,18	164,0 ± 9,7
SBR <sub>ee120_GR1</sub>	2,30 ± 0,20	158,4 ± 16,3

## 5. táblázat. Az előkísérleti minták továbbszakító szilárdsága

Minta	Továbbszakító szilárdság (N/mm)
SBR <sub>ee30</sub>	4,15 ± 0,17
SBR <sub>ee30_GR1</sub>	4,29 ± 0,26
SBR <sub>ee120</sub>	4,40 ± 0,30
SBR <sub>ee120_GR1</sub>	5,16 ± 0,38

kító vizsgálatok során ugyanazon a berendezésen, az ISO 34-1:2015 szabványt [8] alkalmaztuk: 500 mm/min vizsgálati sebesség és 56 mm befogási hossz mellett. A továbbszakító próbatesteken 1 mm-es bemetszést ejtettünk, hogy azok a kívánt helyen szakadjanak el.

A szakítóvizsgálatokat követően a próbatestek töretfelületéről JEOL JSM 6380LA típusú pásztázó elektronmikroszkóppal készítettünk felvételeket.

A Shore keménységmérést Zwick H04.3150 típusú berendezéssel, az ISO 48-4:2018 szabvány [9] szerint, mintánként 10-10 pontban mérve végeztük el.

## 3. Eredmények

### 3.1. Előkísérletek

A szakítóvizsgálat eredményei a **4. táblázat**ban, a továbbszakító vizsgálatok eredményei az **5. táblázat**ban találhatóak. 30 1/min csigasebesség ese-



tén látható a felhasznált 1 phr grafén erősítő hatása: mind a szakítószilárdság, mind a szakadási nyúlás kb. 60%-kal növekedett a töltetlen mintához képest. A magasabb fordulatszám a töltetlen keverék tulajdonságaira kedvezően hatott, míg az SBR<sub>ee120\_GR1</sub> szakadási tulajdonságai elmaradtak a 30 1/perccel kevert mintáéhoz képest. A továbbszakító szilárdságra mind a graféntartalom, mind a magasabb fordulatszám pozitív hatással volt, vagyis a gumi repedésterjedéssel szembeni ellenállását ezek növelik.

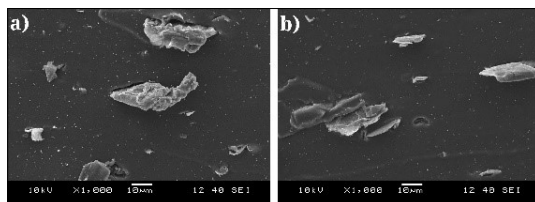
Pásztázó elektronmikroszkópi felvételek (1. ábra) alapján úgy becsültük, hogy az extrúzió során a grafén részecskemérete nem változott, annak eloszlottsága, illetve a polimermolekulák darabolódása okozhatta a vizsgált mechanikai tulajdonságok változását.

### 3.2. Az ikercsigás extrúzió és a zártkeverővel történő keverés összehasonlítása

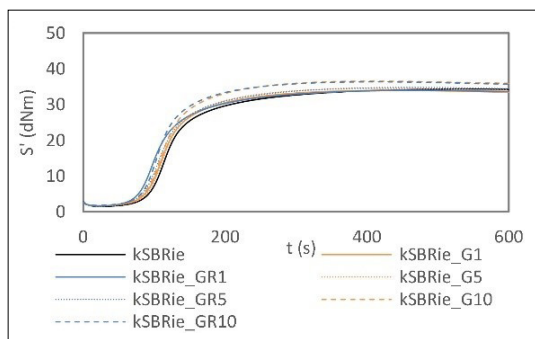
A fő kísérletek során az ikercsigás extruderrel és a zártkeverővel végzett keverés hatásait hasonlítottuk össze. Először a vulkanizációs tulajdonságokat vizsgáltuk. A 2. ábrán az ikercsigás extruderrel előállított minták vulkanizációs görbéit ábrázoltuk, a 3. ábrán pedig a zártkeverővel előállított minták görbéit. A 2. ábra alapján megfigyelhető, hogy a fellépő forgatónyomaték ( $S'$ ) minimális és maximális értékei is növekedtek az erősítőanyag mennyiségének növelésével. Vagyis a minták nyíró modulusa az adalékok hozzáadásának következtében megnőtt. A 90%-os térháló-sodás ideje ( $t_{90}$ ) az adalékanyagok hozzáadásával jelentősen lecsökkent, a 10 phr grafént tartalmazó minta esetén 20%-kal a töltetlen referenciakeverékéhez képest.

A 3. ábrán láthatjuk, hogy a zártkeverőben előállított minták vulkanizációs görbéi között nagyobb az eltérés, mint az extruderrel előállított minták között. A kSBR<sub>b,G10</sub> maximális nyomatókértéke kiugróan kicsi. A vulkaméteren mért maximális nyomatókérték általában a minták keménységével és modulusával korreláló mennyiség. A kSBR<sub>b,G10</sub> vulkanizációs görbéje alapján arra számítottunk, hogy a minta keménysége (5. ábra) is kisebb, mint a többi mintáé; valójában ez a minta a legkeményebb a zártkeverőben előállított keverékek közül.

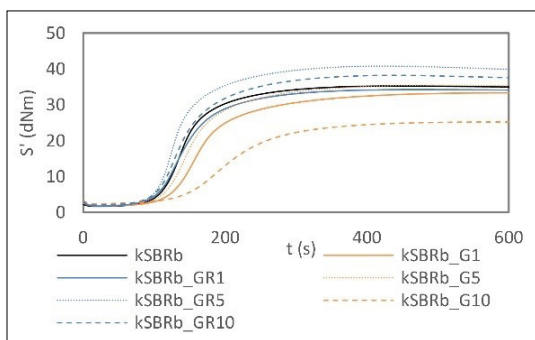
A szakítóvizsgálatok során a grafít és a grafén erősítőhatása közötti különbségre, valamint a tulajdonságok töltőanyag-tartalomtól való függésére kerestük a választ. A szakítóvizsgálatból meghatározott jellemzőket a 6. és 7. táblázat tartalmazza.



1. ábra. Pásztázó elektronmikroszkópi felvételek az előkísérleti minták szakadási töretfelületéről: a) SBR<sub>ee30\_GR1</sub>, b) SBR<sub>ee120\_GR1</sub>



2. ábra. Az ikercsigás extruderrel előállított keverékek vulkanizációs görbéi



3. ábra. A zártkeverőben előállított keverékek vulkanizációs görbéi

6. táblázat. Az ikercsigás extruderrel előállított minták szakítóvizsgálati eredményei

Minta	Szakítószilárdság (MPa)	Szakadási nyúlás (%)
kSBR <sub>ie</sub>	2,87 ± 0,08	120,5 ± 4,1
kSBR <sub>ie_GR1</sub>	3,30 ± 0,31	128,8 ± 4,5
kSBR <sub>ie_GR5</sub>	2,75 ± 0,09	114,7 ± 1,0
kSBR <sub>ie_GR10</sub>	3,82 ± 0,30	125,1 ± 5,8
kSBR <sub>ie_G1</sub>	2,57 ± 0,17	108,9 ± 8,2
kSBR <sub>ie_G5</sub>	2,88 ± 0,16	111,5 ± 1,8
kSBR <sub>ie_G10</sub>	3,24 ± 0,19	115,3 ± 2,1

**7. táblázat.** A zártkeverővel előállított minták szakítóvizsgálati eredményei

Minta	Szakítószilárdság (MPa)	Szakadási nyúlás (%)
kSBR <sub>b</sub>	1,60 ± 0,03	79,6 ± 7,2
kSBR <sub>b</sub> <sub>GR1</sub>	1,27 ± 0,06	65,3 ± 10,6
kSBR <sub>b</sub> <sub>GR5</sub>	3,05 ± 0,06	92,6 ± 4,9
kSBR <sub>b</sub> <sub>GR10</sub>	3,96 ± 0,08	162,5 ± 18,6
kSBR <sub>b</sub> <sub>G1</sub>	1,76 ± 0,04	93,2 ± 6,7
kSBR <sub>b</sub> <sub>G5</sub>	2,49 ± 0,07	91,8 ± 2,0
kSBR <sub>b</sub> <sub>G10</sub>	2,54 ± 0,08	76,4 ± 1,9

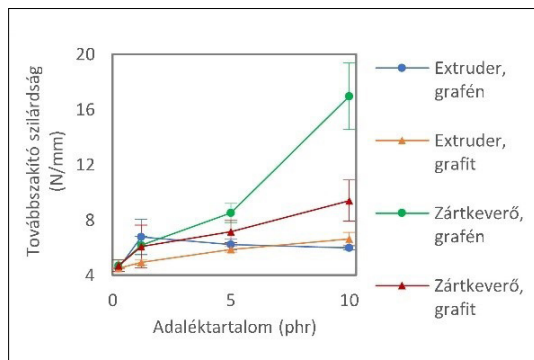
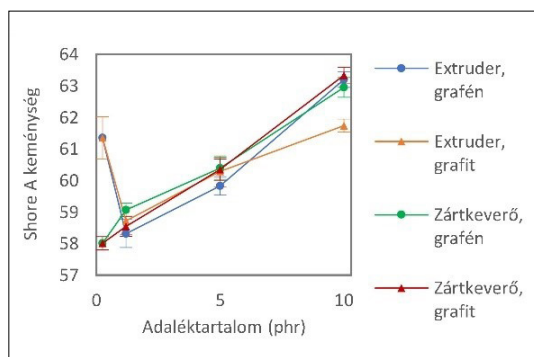
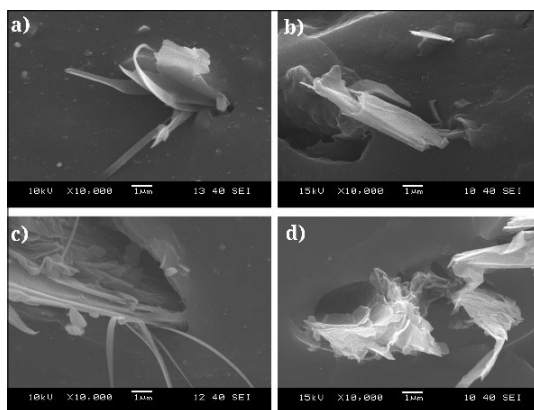
Az ikercsigás extrúzió esetén (6. táblázat) elmondható, hogy a grafénnel jobb eredményeket lehet elérni, mint a grafittal. Az 1 phr grafént tartalmazó minta szakítószilárdsága közel azonos értékű, mint a 10 phr grafítot tartalmazó mintáé. Szakítószilárdság tekintetében a 10 phr grafént tartalmazó keverék teljesített a legjobban: 30%-os javulást ért el a töltetlen keverékhez képest.

A zártkeverővel előállított minták szakítóvizsgálati eredményeit a 7. táblázatban foglaltuk össze. E minták többségének szakadási nyúlása nem éri el a 100%-ot. Egyetlen kivételt képez a 10 phr graféntartalmú minta, amely 160%-os szakadási nyúlásával kiemelkedik mind a zártkeverővel, mind az ikercsigás extruderrel készített minták közül.

A 4. ábrán az ikercsigás extruderrel és a zártkeverőben homogenizált minták továbbszakító szilárdságát ábrázoltuk az adaléktartalom függvényében. A zártkeverőben homogenizált minták értékei rendre nagyobbak az extrudált mintákéhoz képest. Ez alátámasztja azt a feltevést, hogy az extruderben fellépő nagy nyírás a polimerláncok szakadásához vezet.

Az előállított minták Shore-keménységét az adaléktartalom függvényében az 5. ábrán összegeztük. Egyértelmű trendként figyelhető meg, hogy a hozzáadott adalékanyagok növelik a nanokompozitok keménységét. Eljárástól és az erősítés típusától függetlenül kb. megegyező értékeket mérünk azonos összetétel esetén. Kiugró kivételt képez az ikercsigás extruderrel előállított töltetlen keverék, amelynek 61,3±0,7 Shore A keménysége meghaladja az 5 phr adaléktartalmú minták keménységét.

A pásztázó elektronmikroszkópi vizsgálat feltárta a kompozit mikroszerkezetét; az ezt szemléltető képeket a 6. ábrán mutatjuk be. A felvételeket

**4. ábra.** Nanokompozit-minták továbbszakító szilárdsága az adaléktartalom függvényében**5. ábra.** Nanokompozit-minták Shore A keménysége az adaléktartalom függvényében**6. ábra.** Pásztázó elektronmikroszkópi felvételek az előállított kompozitok szakadási töretfelületeiről: a) kSBR<sub>ie,GR10</sub> b) kSBR<sub>b,GR10</sub> c) kSBR<sub>ie,G10</sub> d) kSBR<sub>b,G10</sub>

úgy választottuk ki, hogy a töretfelületre leginkább jellemző részleteket mutassuk be. A grafít és a grafén is jól láthatóan lemezes szerkezetű, a különbséget a lemezek száma jelenti. A felvételeket

ken látható, hogy a grafit lényegesen több rétegű, és a próbatest tönkremenetele során maga is alakváltozhatott. Ezzel szemben a grafén látszólagosan megőrizte a kiindulási szerkezetét, ezek a részecskék a mátrixból kiemelkedve maradtak a felületen. Az ikercsigás extruderrel homogenizált mintákról készült felvételeken láthatók vékony, hosszúkás, az adalék szemcséiből induló fibrillák, amelyek nagy fajlagos felületükkel erős adhézió kialakítását tették lehetővé az alapmátrixszal. Mind a grafénnel, mind a grafittal töltött minták esetén az ikercsigás extruderrel előállított mintákban váltak szét sikeresebben az adalékok részecskéi.

#### 4. Következtetések

Előkísérleteink során bebizonyosodott, hogy a grafén már kis mennyiségben (1 phr) is jelentős mechanikaitulajdonság-javulást eredményez.

Fő kísérleteink segítségével bemutattuk, hogy az ikercsigás extrúzióval jobb adalékeloszlást értünk el, mint a zártkeverővel végzett keverékkészítéssel. Ennek ellenére mégis a zártkeverőben készített minták továbbszakító szilárdsága és keménysége a nagyobb. Az eltérésből arra következtetünk, hogy az ikercsigás extrúzió során az intenzívebb nyíró igénybevétel hatására a molekulatömeg lecsökkent.

Kijelenthetjük, hogy a grafénerősítésű gumik fejlesztésében nagy potenciál van. A keverékkészítéshez alkalmazott eljárások hatásmechanizmusait mélyebben fel kell tárni az egyértelműbb következtetésekhez.

#### Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásának jóvoltából valósult meg a 2017-2.3.6-TÉT-CN-2018-00002 számú ipari kutatás-fejlesztési együttműködési pályázat keretein belül. Ezúton köszönjük Mórítz Szilviának a mérések során nyújtott segítséget.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Formela K., Hejna A., Zedler L., Colom X., Cañavate J.: *Microwave treatment in waste rubber recycling - recent advances and limitations*. Express Polymer Letters, 13. (2019) 565–588. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2019.48>
- [2] Kaewpetch B., Prasongsuk S., Poompradub S.: *Devulcanization of natural rubber vulcanizates by Bacillus cereus TISTR 2651*. Express Polymer Letters, 13. (2019) 877–888. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2019.76>
- [3] Cao L., Sinha T. K., Tao L., Li H., Zong C., Kim J. K.: *Synergistic reinforcement of silanized silica-graphene oxide hybrid in natural rubber for tire-tread fabrication: A latex based facile approach*. Composites Part B: Engineering, 161. (2019) 667–676. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.024>
- [4] Hajba S., Tábi T.: *Cross effect of natural rubber and annealing on the properties of poly(lactic acid)*. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 63. (2019) 270–277. <https://doi.org/10.3311/PPme.12825>
- [5] Guo H., Ji P., Halász I. Z., Pirityi D. Z., Bárány T., Xu Z., Zheng L., Zhang L., Liu L., Wen S.: *Enhanced fatigue and durability properties of natural rubber composites reinforced with carbon nanotubes and graphene oxide*. Materials, 13. (2020) 5746. <https://doi.org/10.3390/ma13245746>
- [6] Berki P., László K., Tung N. T., Karger-Kocsis J.: *Natural rubber/graphene oxide nanocomposites via melt and latex compounding: Comparison at very low graphene oxide content*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 36. (2017) 808–817. <https://doi.org/10.1177/0731684417690929>
- [7] ISO 37:2017: Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of tensile stress-strain properties, 2017.
- [8] ISO 34-1:2015: Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of tear strength – Part 1: Trouser, angle and crescent test pieces, 2015.
- [9] ISO 48-4:2018: Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of hardness – Part 4: Indentation hardness by durometer method (Shore hardness), 2018.

# Réz és ausztenites korrózióálló acél vegyes kötésének kialakítása ultrahangos hegesztéssel

## Producing a Dissimilar Joint of Copper to Austenitic Stainless Steel by Ultrasonic Welding

Schramkó Márton,<sup>1</sup> Kovács Tünde Anna<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyag és Alakítástechnológiai Intézet, Budapest, Magyarország, kovacs.tunde@uni-obuda.hu

### Abstract

There are several possibilities for establishing a cohesion joint between dissimilar metals. In the case of thin sheets, the ultrasonic welding process is suitable. This process can establish a cohesion joint rapidly, with a low heat input between the thin sheets. The authors have tried to determine the optimal ultrasonic welding parameters for copper and austenite stainless steel joining by using an experimental method of joining. Suitable results were obtained by welding tests due to dissimilarities in the chemical, physical and mechanical properties of the copper and stainless steel. A standard size sheet thickness and test sample was used for the welding by different parameters. The parameters were refined based on the theoretical and practical knowledge during the experiments. The experimental welding was made by a Branson L20 type welder machine. The joint made by the different parameters was inspected by shearing-tensile tests (maximal force level).

**Keywords:** *ultrasonic welding, copper, stainless steel.*

### Összefoglalás

Különböző fémek között kohéziós kötés létrehozására számos lehetőség van. Vékony lemezek esetében jól alkalmazható hegesztési eljárás az ultrahangos hegesztés. Ezzel az eljárással gyorsan, kis hőbevitellel lehet kohéziós kötést létesíteni vékony lemezek között. A szerzők ebben a munkában tiszta réz és ausztenites korrózióálló acéllemezek ultrahangos hegesztésének optimális paramétereit igyekeztek meghatározni kísérleti úton. A réz és az ausztenites acél eltérő kémiai, fizikai és mechanikai tulajdonságai miatt a próbahegesztés hozott eredményt. A kísérletekhez a szerzők adott lemeztvastagságú és méretű próbatesteket használtak fel, majd ezen paraméterek változtatása mellett hegesztették össze. Az előzetes elméleti és gyakorlati tapasztalatok alapján megválasztott paraméterek finomítását végezték el a kísérletsorozat során. A kísérleti hegesztésekhez Branson L20 típusú ultrahangos hegesztőberendezést alkalmaztak. A különböző paraméterekkel készült kötések húzó-nyíró vizsgálattal minősítették, a maximális erő értékével.

**Kulcsszavak:** *ultrahangos hegesztés, réz, korrózióálló acél.*

### 1. Bevezetés

Az ipar a kötéstechnológiát egyre újabb kihívások elé állítja. A kis hőbevitelű eljárások nem csak az ömlesztőhegesztés területén fejlődnek, de egyre szélesebb körben alkalmaznak sajtolóhegesztési eljárásokat vagy forrasztást a vékony lemezek összekapcsolására [1, 2]. Az ultrahangos

hegesztés kis hőbevitelt okozó, hidegsajtoló hegesztési eljárás, mellyel kohéziós kötést hoznak létre hozzáadott hegesztőanyag alkalmazása nélkül. Az eljárás igen egyszerű, amennyiben a hegesztési paraméterek optimalizálása megtörtént, a kezelő személynek nem kell minősített hegesztőnek lennie, betanított munkás által elvégezhető feladat, ráadásul a jellemző hegesztési veszélyfor-

rások (fröcskölés, füst, hő) is igen csekély mértékben jelentkeznek. Természetesen az ultrahanghajtás ellen a kezelő hallószerveit védeni szükséges.

Az ultrahangos hegesztés kezdetei visszanyúlnak Pierre Curie-hez, aki fizika- és kémiaprofesszor volt, a kristályos anyagok vizsgálata során, 1881-ben felfedezte az elektromos feszültség és a nyomás kapcsolatát [3]. A párizsi Sorbonne Egyetem fizikalaboratóriumában látott el asszisztensi feladatokat már fiatalkori éveiben is. Doktoranduszi éveit a krisztallográfiának szentelte, ezen belül a kristályos anyagok eloszlásának problémájával foglalkozott, amelyeket a szimmetria törvényszerűsége alapján vizsgált. A doktori ki-nevezést 1895-ben kapta. Bátyjával, Jaque Curievel együtt alátámasztották a piezoelektronosság létét, és a megnevezés is tőlük származik. Ez a felfedezés volt az alapköve a modern ultrahangos energiaátalakítóknak és az ultrahangos hegesztés kialakulásának, majd egyre szélesebb körű elterjedésének [3].

George Ludwig, a Pennsylvania Egyetem kutatója 1940-ben vizsgálta, majd rögzítette a hanghullámok irányváltozását a test különböző részein keresztül. Az emberi szervezetben létrejövő epékó kimutatásával és roncsolásmentes vizsgálatával töltötte a legtöbb időt a kutatásai közül. Sikeres eredményei nyomán megszülethetett az ultrahangos vizsgálat, amit a mai napig rengeteg helyen alkalmaznak az orvostudomány területén. Ennek elve megegyezik az iparban alkalmazott roncsolásmentes anyagvizsgálatokéval, az eljárást leginkább a hegesztett kötések ellenőrzésénél használjuk a gyakorlatban.

1960-ban az eljárás elkezdett elterjedni az ipari környezetben is. Robert Soloff laborvezető idejében a Branson Instruments vállalatnál azzal foglalkoztak, hogy műanyag fóliákat hegesztettek össze zsákokká. Egy nap véletlenül a műanyag-szalag-adagolóhoz érintette a hegesztő szondát, és ezek kötetést létesítettek. Ekkor eszmélt rá, hogy az ultrahang képes átlépni és terjedni a szilárd anyagokban is, és ezáltal képes összehegeszteni a különböző anyagokat. 1969-ben jelent meg az első, műanyagból készített autó, amelyet ennek az eljárásnak a felhasználásával hozott létre a Robert Soloff által alapított Sonics&Materials nevű vállalat. Igaz, a kisautó nem aratott nagy sikert, de a technológia megtette az első lépést a naggyá váláshoz, ekkor kezdték el ugyanis felfedezni a benne rejlő lehetőségeket. Bár ez a termék nem aratott osztatlan sikert, a gyár sikeresen üzemel a mai napig, és azóta is foglalkoznak az ultrahangos hegesztéssel is.

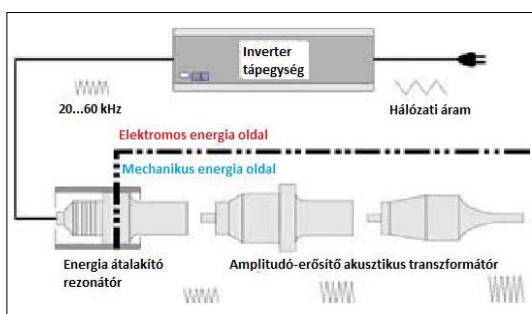
Az ultrahangos hegesztés során a felületeket kis nyomásnak tesszük ki, mely közben az ultrahang által keltett rezgőmozgás a hegesztett felületek érdességi kiemelkedéseit és az oxidrétegeket roncsolja, és ezáltal a fémes felületeket egymásba dörzsöli, létrehozva a kötetést. A művelet hatalmas előnye, hogy nem kell hőt közölni kívülről a munkadarabbal, így a hősokkból keletkező deformációk elkerülhetők. Kiválóan alkalmas műanyagok, acélok és egyéb fémek hegesztésére, eltekintve a kivételektől, például túl kemény anyagoknál gyorsan felléphet a kifáradás okozta repedés, ellenben a jól alakítható és nagy csillapítási tényezőjű anyagok jól hegeszthetők [4].

További előnye az eljárásnak, hogy a környezetet nagyon minimális szinten terheli, semmilyen káros hulladék a technológiai folyamat során nem termelődik.

## 2. Ultrahangos hegesztés

Ez a hegesztési mód igen érdekes, hiszen elektromos áramból állít elő rezgéseket, mely rezgések a hegesztőfejen (szonotródnán) keresztül rezgetik meg a megmunkálandó darabot. Ennek a hatásnak, valamint az összeszorító erőnek a hatására következik be maga a hegesztés. A folyamat során nincs nagy hőhatásövezet, illetve mind ponthegeztésként, mind vonalhegeztésként lehet alkalmazni. A folyamat időigénye kicsi, például ponthegesztés esetében 1-2 másodperc. Ezzel az eljárással könnyen lehet hegesztést végezni különböző anyagok között, ugyanakkor sajnos csak nagy alakíthatóságú, nemridegő anyagokhoz alkalmazható. Fontos, hogy a munkadarab vastagsága ne legyen nagy, ugyanis a hegesztés 0,5–1,5 mm közötti lemezvastagság esetén használható. Ezért a kísérleteket ezeket a paramétereket betartva valósítottuk meg [5].

A berendezés elektrostrikiós vagy magnetostrikiós elven működik (1. ábra).



1. ábra. Az ultrahangos ponthegeztés sematikus ábrája [1]



Az ultrahangos hegesztőgépeknek két nagy csoportja van: a vonal- és a ponthegeztők. Ezek elve szinte teljesen megegyezik. A legfőbb különbség, hogy a vonalhegesztő esetében a hangkeltő és az átvitelt biztosító tagok mind forgathatók, illetve a szonotróda és az ülők is. Az ultrahangos ponthegeztő gép külsőleg az ellenállás-hegesztő géphez hasonlít (2. ábra). A megmunkálandó darabok a szonotróda és gép ülője között helyezkednek el. A szorító terhelést hidraulikus vagy pneumatikus gépezet hozza létre.

### 3. Az alkalmazott anyagok és a kísérletek

Auszténites korrózióálló acél és réz összehegesztése az eltérő fizikai, kémiai és mechanikai tulajdonságaik miatt nem egyszerű feladat. Előkísérletek során már elvégeztük a réz-réz és az auszténites korrózióálló acél ultrahangos hegesztési paramétereinek optimalizálását.

A kísérleteink során két anyagot használtunk: egy rozsdamentes acéllemezt, illetve egy 99,5%-os tisztaságú rézlemezt, a 3. ábrán jelölt méretekkel.

Az alkalmazott, X5CrNi8-10 (1.4301) minőségű rozsdamentes acélra, gyorshűtéssel lágyított ál-

lapotban jellemző mechanikai tulajdonságok: egyezményes folyáshatára  $R_{p0,2} = 190$  MPa, szakítószilárdsága  $R_m = 500\text{--}700$  MPa, villamos vezetőképessége  $0,73$  m/( $\Omega \cdot \text{mm}^2$ ).

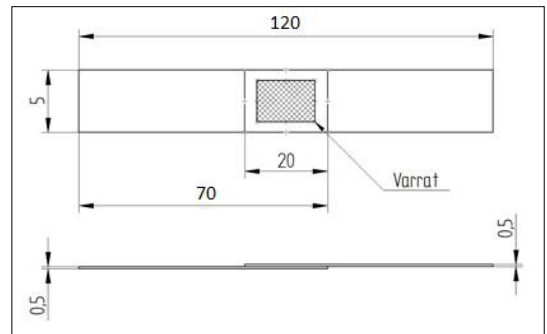
Az alkalmazott CW024A (Cu-DHP 2.0090) rézlemezre jellemző, hogy jól alakítható, kiváló villamos vezetőképességű [ $56\text{--}58$  m/( $\Omega \cdot \text{mm}^2$ )] és jó korrózióállóságú, szakítószilárdsága  $R_m = 240$  MPa, egyezményes folyáshatára  $R_{p0,2} = 180$  MPa, keménysége  $65\text{--}95$  HB.

A vizsgálataink során a szakirodalom tanulmányozása alapján egy egymásra épülő kísérletsorozatot folytattunk [6, 7]. Először a hegesztési idő függvényében kapott eredményeket elemeztük, majd az amplitúdó, végül a fő sajtoló terhelés szerint kapott eredményeket. A legnagyobb húzóerő-eredmények elérése után elvégeztünk egy korrekciós mérést, hogy a paraméteregyüttes mindegyik külön pontban felvett értéket adja végeredményben is. A mért maximális húzóerőt az amplitúdó és a hegesztési idő függvényében (4. és 5. ábra) mutatja.

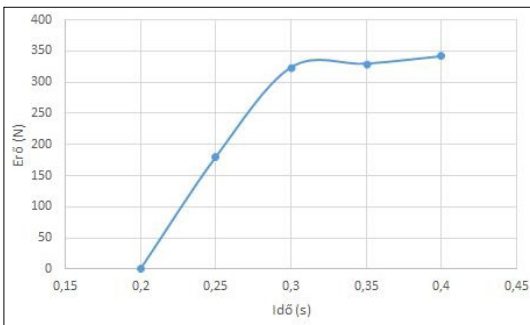
Az elő- és főterhelés értékét a berendezés pneumatikus hengerében a hegesztés során fennálló



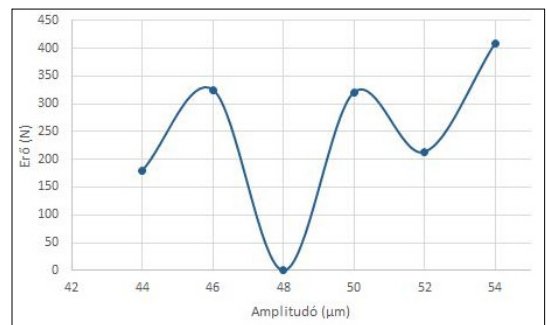
2. ábra. Az alkalmazott ponthegeztő gép



3. ábra. A hegesztett próbatest kialakítása



4. ábra. A maximális szakítóerő a hegesztési idő függvényében állandó amplitúdó és hegesztési sajtoló terhelés mellett (paraméterek: amplitúdó =  $50 \mu\text{m}$ ; Elő- és főterhelés:  $0,345$  MPa)



5. ábra. A maximális szakítóerő az amplitúdó függvényében (paraméterek: idő:  $0,3$  s; Elő- és főterhelés:  $0,3$  MPa)

nyomás értéke szerint kell megadni (0,345 MPa).

A mérések 7%-os szórást mutattak az egyes tesztek során, melyek az ultrahangos hegesztés esetében elfogadhatónak tekinthetők.

Mivel az ausztenites acél hővezető képessége kicsi, hőkamerával láthatóvá válnak a hő-, illetve feszültséggyűjtő helyek, ahogyan ez megfigyelhető a következő, **6. ábrán** is.

A réz és az ausztenites korrózióálló acél vegyes kötése ultrahangos hegesztési paramétereinek meghatározásához próbahegesztéseket végeztünk.

A vizsgálataink során azt állapítottuk meg, hogy a legjobb paraméteregyüttes a kötés kialakítására az alkalmazott acél és réz esetében az **1. táblázat**-ban található paraméterek voltak.

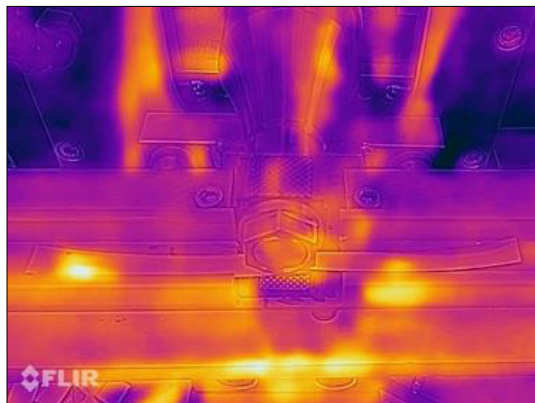
#### 1. táblázat. Az ultrahangos hegesztés legjobbnak talált paramétere

Paraméter	Mennyiség
Elő- és főterhelés (berendezés nyomásértéke)	0,345 MPa
Idő	0,3 s
Amplitúdó	50 $\mu$ m

#### 4. Következtetések

A kísérletek eredményei alapján elmondhatjuk, hogy az ultrahangos hegesztéssel jó eredményekkel lehet egyesíteni a különböző olvadáspontú anyagokat. A vizsgált réz- és acéllemezek közti kötés megvalósítható, és a kötések szilárdsága is megfelelőnek tekinthető, mivel a nyíró-szakító vizsgálat során nem a varratban szakadtak el a kísérleti darabok.

Az alkalmazott Branson berendezéssel végzett kísérletek eredményei szerint az alkalmazott, X5CrNi8-10 (1.4301) minőségű rozsdamentes acél és a CW024A (Cu-DHP 2.0090) rézlemez hegesztése az optimális varratszilárdság eléréséhez javasolt paraméterek a következők: hegesztési idő 0,3 s, amplitúdó 50  $\mu$ m, 0,345 MPa elő- és főterhelés mellett, melyet hidraulikus rendszer biztosít a hegesztés során.



**6. ábra.** Ultrahangos ponthegeztés hőkamerás képe, hőmérsékleti színskálát nem tartalmaz, mert a hőkamera nem kalibrált

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Bagyinszki Gy., Bitay E.: *Hegesztéstechnika II. Berendezések és mérések*. Műszaki Tudományos Füzetek 10., EME, Kolozsvár/Cluj, 2010. <https://doi.org/10.36242/mtf-09>
- [2] Bagyinszki Gy., Bitay E.: *Hegesztéstechnika I. Eljárások és gépesítés*. Műszaki Tudományos Füzetek 9., EME Kolozsvár/Cluj, 2010. <https://doi.org/10.36242/mtf-08>
- [3] Woo J.: *A short History of the development of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*. Pierre Curie. (letölte: 2019. 04. 15.) <http://www.ob-ultrasound.net/curie.html>
- [4] Wu X., Liu T., Cai W.: *Microstructure, Welding Mechanism, and Failure of Al/Cu Ultrasonic Welds*. Journal of Manufacturing Processes, 20/1. (2015) 321–331. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.002>
- [5] Astashev V. K., Babitsky V. I.: *Ultrasonic Processes and Machines, Dynamics, Control and Applications*. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg, 2007, 33–45.
- [6] Callister W. D., Rethwisch D. G.: *Materials science and engineering an introduction*, 8<sup>th</sup> ed., John Wiley&Sons, Inc. USA, 2000. 219–222.
- [7] Chen K., Zhang Y.: *Mechanical analysis of ultrasonic welding considering knurl pattern of sonotrode tip*. Materials and Design, 87/5. (2015) 393–404. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.042>