

ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA

Anyagtudományi Közlemények

8. évfolyam, 2025. 1. szám



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET
Kolozsvár
2025

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



Főszerkesztő / Editor-in-Chief: Bitay Enikő

Nemzetközi Tanácsadó testület / International Editorial Advisory Board:

Prof. Bíró 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, HUN-REN-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. Kolozsvári 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, HUN-REN-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: Bíró 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 2024

ISSN 2601-1883, ISSN-L 2601-1883

DOI: 10.33923/amt-2025-01

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 közöl tudományos közleményeket: szakcikkeket, összefoglalókat (szemléket), tanulmányokat. A folyóirat célja összképet adni kiemelten a Kárpát-medencei kutatási irányokról, tudományos eredményeiről, s ezt széles körben terjeszteni is. A folyóirat az EME felvállalt céljaihoz híven a magyar szaknyelv ápolását is támogatja, így a nyomtatott folyóirat magyar nyelven jelenik meg, mely az Erdélyi digitális adattárban elérhető (<https://eda.eme.ro/handle/10598/30356>). A széles körű nemzetközi terjesztés érdekében a folyóirat teljes angol nyelvű változatát is közzétesszük.

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

Tartalom / Content

BOGNÁR ADRIÁN, KUN KRISZTIÁN, ZSIDAI LÁSZLÓ	1
<i>A technológiai paraméterek hatása PolyJet eljárással előállított próbatestek mechanikai tulajdonságaira</i>	
<i>Effect of Technological Parameters on the Mechanical Properties of Test Specimens Produced by Polyjet Technology</i>	
GERBOVITS DITTA ADRIENN, NAGY ROLAND, PUSKÁS SÁNDOR	8
<i>Környezetbarát tenzidek kőolaj-kihozatali célra való felhasználhatóságának vizsgálata</i>	
<i>Investigation of the Applicability of Environmentally Friendly Surfactants for Oil Recovery</i>	
KÁNTOR JÓZSEF, GERGELY ATTILA LEVENTE	13
<i>Szálpaplanok előállítása újrahasznosított PET-palackból</i>	
<i>Production of Fibre Mats from Recycled PET Bottles</i>	
KERTÉSZ OLIVÉR GÁBOR, TÓTH LÁSZLÓ	17
<i>UNIMAX szerszámacél tulajdonságainak javítása felületbevonatolással</i>	
<i>Improving the Properties of UNIMAX Tool Steel by Surface Coating</i>	
KOZÁK EMESE, KOVÁCS ZSOLT FERENC	23
<i>A szerszám fejlesztése alumíniumötvözetek kavaráó dörzshegesztéséhez</i>	
<i>Tool Development for Friction Stir Welding of Aluminium Alloys</i>	
MÉSZÁROS BÉLA, FÁBIÁN ENIKŐ RÉKA	28
<i>Különböző felületi kialakításokra gyakorolt hatása a lézeres felületedzésnek 1.2379 szerszámacél esetén</i>	
<i>Effect of Laser Surface Hardening on Different Surface Designs in the case of 1.2379 Tool Steel</i>	
SIMON VIRÁG, VARBAI BALÁZS, PUSKÁS ZSOLT	34
<i>A kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetésének hatása kézi lézeres hegesztés esetén</i>	
<i>The Effects of the Laser Pulse Duty and the Wobble in Case of Manual Laser Welding</i>	

SZENDI DORINA, TÁRKÁNYI SÁNDOR, KÓSA BALÁZS	38
<i>Fenntarthatóság rétegről rétegre: Liapor- és cellulóz-alapú hőszigetelés kombinációja homlokzati falpanelben</i>	
<i>Sustainability Layer by Layer: Combining Liapor and Cellulose-Based Insulation in a Facade Wall Panel</i>	
SZOVÁK BENEDEK, KEMÉNY ALEXANDRA, ORBULOV IMRE NORBERT	43
<i>Alternatív eljárás irányított szállal erősített szintaktikus fémhabok gyártására</i>	
<i>An Alternative Process for the Production of Oriented Fibre Reinforced Syntactic Metal Foams</i>	
ZAMIUL ALAM MD, SCHRAMKÓ MÁRTON, KOVÁCS TÜNDE ANNA	47
<i>A szorítónyomás hatása nikkelbevonatos rézlemez és alumíniumlemez között ultrahangos hegesztés közben</i>	
<i>Effect of Welding Pressure During Ultrasonic Welding Between Nickel-Plated Copper and Aluminium Sheets</i>	



A technológiai paraméterek hatása PolyJet eljárással előállított próbatestek mechanikai tulajdonságaira

Effect of Technological Parameters on the Mechanical Properties of Test Specimens Produced by PolyJet Technology

Bognár Adrián,¹ Kun Krisztián,² Zsidai László³

¹ Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország, bognar.adrian@nje.hu

² Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország.

³ Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Szent István Campus, Gépészeti Technológiák Központ, Anyagtudományi és Gépipari Folyamatok Tanszék, Gödöllő, Magyarország.

Abstract

The expansion of additive manufacturing technologies enables the rapid and efficient production of parts with complex geometries, making them increasingly important in the production of functional prototypes and finished products. To ensure the reliable performance of these parts, it is essential to optimize the printing parameters and analyze the material properties of the printed parts. In this study, the thermomechanical properties of 3D printed test specimens produced by PolyJet technology were analysed, with a particular focus on the glass transition temperature and the loss factor. The investigation concentrated on the influence of printing orientation and layer thickness, as these key parameters affect the mechanical behaviour of the finished parts.

Keywords: *additive manufacturing, PolyJet technology, thermomechanical properties, layer thickness.*

Összefoglalás

Az additív gyártási technológiák elterjedése lehetővé teszi a komplex geometriájú alkatrészek gyors és hatékony előállítását, így egyre nagyobb szerepet kap a funkcionális prototípusok és végeredmékek gyártásában. Az így gyártott alkatrészek megbízható alkalmazhatóságának biztosítása érdekében elengedhetetlen a nyomtatási paraméterek optimalizálása és a nyomtatott darabok anyagszerkezeti vizsgálata. A kutatásban PolyJet rendszerű 3D-s nyomtatással készült próbatestek termomechanikai tulajdonságainak elemzése történt, különös tekintettel az üvegesedési hőmérséklet és a veszteségi tényező alakulására. A vizsgálatok során a nyomtatási orientációra és a rétegvastagság hatására helyeződött a hangsúly, mivel ezek az alapvető paraméterek befolyásolják az elkészült alkatrészek mechanikai viselkedését.

Kulcsszavak: *additív gyártás, PolyJet eljárás, termomechanikai tulajdonságok, rétegvastagság.*

1. Bevezetés

A PolyJet technológia alkalmazásával készült próbatestek mechanikai tulajdonságai, mint a szakítószilárdság, szakadási nyúlás és rugalmassági modulus, jelentős mértékben függenek a nyomtatási orientációtól és rétegvastagságtól. A szakítóvizsgálatok alapján a nyomtatási irányok

és a rétegvastagság változása alapvetően befolyásolják a próbatestek mechanikai viselkedését. Eltérő orientációk esetén különböző eredmények figyelhetők meg a szakítószilárdság, rugalmassági modulus és szakadási nyúlás tekintetében. A nyomtatási orientáció emellett hatással van a keménységre és az üvegesedési hőmérsékletre is. A dinamikus termomechanikai analízis (DMTA)

vizsgálatok [1] során a komplex rugalmassági modulus és a veszteségi tényező értékei orientációfüggők. Ezen túlmenően, különböző anyagok között is kimutathatók mechanikai eltérések, amelyek a nyomtatási paraméterek függvényében módosulnak, elősegítve a specifikus alkalmazásokhoz szükséges tulajdonságok finomhangolását.

1.1. A nyomtatási orientáció hatása a mechanikai tulajdonságokra

A PolyJet eljárással készült próbatestek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata során a szerzők megállapították, hogy az anyag anizotrop viselkedést mutat. Vizsgálataik szerint egy síkon belüli orientációváltás esetén a rugalmassági modulusban nem jelentkezett szignifikáns eltérés, azonban eltérő építési síkokban a szakítószilárdság és a szakadási nyúlás jelentős különbségeket mutatott. Kimutatták, hogy az álló helyzetben nyomtatott próbatestek esetében a szakítószilárdság növekedett, míg a szakadási nyúlás csökkent, ezzel szemben a fekvő helyzetben készült próbatesteknél fordított tendencia volt megfigyelhető. A rétegvastagság változtatása a fekvő próbatestek esetében nem befolyásolta az eredményeket, míg az álló próbatesteknél hatással volt a mechanikai tulajdonságokra. Az építési iránnyal párhuzamos próbatesteknél a szakítószilárdság jelentősen csökkent a többi orientációhoz képest, ami megerősítette az anyag anizotrop jellegét [2].

Egy másik tanulmány hajlítóvizsgálattal hasonló következtetésre jutott, ahol különböző nyomtatási orientációkban készült próbatesteket hasonlítottak össze. A vizsgálatok során megállapították, hogy az Y irányban gyártott próbatestek rendelkeznek a legnagyobb hajlítószilárdsággal, míg a merev anyagok esetében a legkisebb értéket a Z, a rugalmasabb anyagoknál pedig az X irányú próbatestek mutatták. A hajlító rugalmassági modulus vizsgálata során az Y orientáció kedvezőbb eredményeket mutatott az X irányhoz képest, míg a Z irányban a modulus csökkenése figyelhető meg az anyag növekvő rugalmasságával [3].

1.2. A nyomtatási orientáció és rétegvastagság hatása az üvegesedési hőmérsékletre

A kutatások célja a PolyJet technológiával nyomtatott próbadarabok viszkoelasztikus és termomechanikai tulajdonságainak vizsgálata volt különböző nyomtatási paraméterek mellett. Az első kísérletben a kutatók a rétegvastagság és a nyomtatási orientáció hatását vizsgálták az üve-

gesedési hőmérsékletre. A vizsgálatok alapján az X orientációban volt a legmagasabb, Y orientációban pedig a legalacsonyabb, mintegy 20 °C különbséggel. A nagyobb rétegvastagságú nyomtatás nagyobb üvegesedési hőmérsékletet eredményezett [4].

1.3. Az anyagminőség és a nyomtatási orientáció hatása a komplex rugalmassági modulusra és a veszteségi tényezőre

Jelen kutatásban a PolyJet technológiával készült próbatestek komplex rugalmassági modulusának változását vizsgálták a síkon belüli orientáció és a vizsgálati konfiguráció függvényében. Az eredmények szerint a vízszintes és függőleges nyomtatás között nem volt lényeges különbség, azonban a húzóvizsgálat nagyobb dinamikus-modulus-értékeket mutatott, míg a hajlítóvizsgálatnál nagyobb veszteségi tényezőt mértek. Megvizsgálták továbbá anyagok komplex modulusát és veszteségi tényezőjét is. A merevebb anyagok rugalmassági modulusának értéke három nagyságrenddel változott a frekvencia növekedésével, míg a rugalmasabb anyagok esetében ez a változás csak négyszeres volt [5, 6].

A feldolgozott irodalmi források alapján meghatározhatók azok a paraméterek, amelyek hatással vannak a gyártott alkatrészek mechanikai tulajdonságaira. A vizsgálatok egyértelműen rámutattak, hogy a különböző nyomtatási orientációk és a rétegvastagság befolyásolják a próbatestek mechanikai jellemzőit, emellett az alkalmazott anyagminőség is kulcsszerepet játszik a kapott eredményekben.

2. A kísérlet módszertana

Jelen kutatásban a cél a PolyJet eljárással nyomtatott próbatestek üvegesedési hőmérsékletének vizsgálata, különböző rétegvastagságok és nyomtatási orientációk figyelembevételével. A kísérlet során az anyagminőség változatlan, ennek hatását a cikk nem vizsgálja.

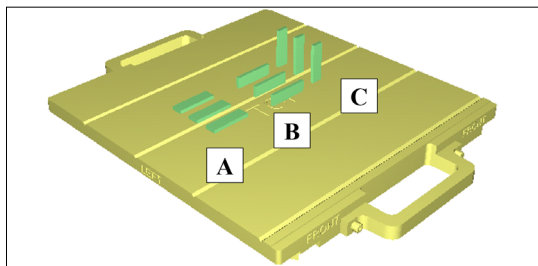
2.1. A vizsgálati próbatestek

A próbatestek három különböző orientációt vettek fel: XYZ (A), XZY fekvő (B), valamint ZXY (C) építési irányt (1. ábra).

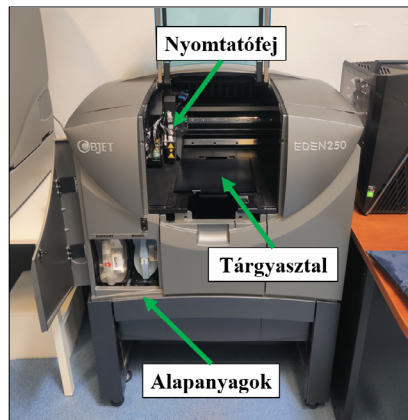
Az anyagvizsgálati eredmények azt mutatták, hogy a nyomtatási orientáció is hatással volt a mechanikai tulajdonságokra, azonban a síkon belüli további elrendezések hatása elhanyagolható. A próbatestek csoportosítása és elnevezése az 1. táblázatban látható. A rétegvastagság a nyomtatási sebességgel párhuzamban változtatható,

1. táblázat. A próbatetek csoportosítása és elnevezésük

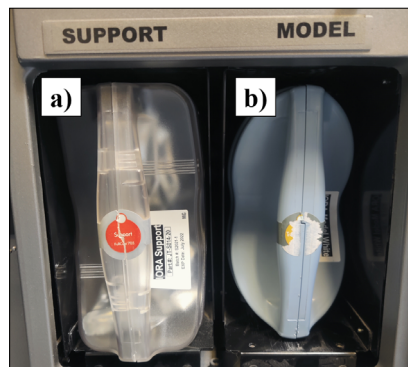
Orientáció	Nagy sebesség (HS)	Kiváló minőség (HQ)
XYZ (A)	HSA	HQA
XZY (B)	HSB	HQB
ZXY (C)	HSC	HQC



1. ábra. A próbatetek elrendezése az Objet Studio szeletelő szoftverben



2. ábra. Objet Eden 250 PolyJet 3D nyomtató



3. ábra. Az alapanyagok a PolyJet nyomtatóban: a) támaszanyag és b) modellanyag

így a választott üzemmód a nagy sebesség (HS), valamint a kiváló minőség (HQ) volt.

A DMTA-vizsgálatokhoz hasáb alakú próbatestre van szükség, ennek méretét az általunk használt mérőfeltételhez választottuk meg. A meghatározott méret ezek alapján 35×10×3 mm. A próbatetek modellezése és STL-fájlformátumba való exportálása Autodesk Fusion 360 szoftverrel történt.

2.2. A PolyJet rendszerű 3D-s nyomtató

A próbateteket Stratasys Eden 250 típusú PolyJet 3D nyomtatón (2. ábra) gyártottuk. A kutatásban használt 3D-s nyomtató két eltérő tulajdonságú alapanyagot tud kezelni, esetünkben egy modellt, valamint egy támaszt. A nyomtató tárgyasztala 250×250 mm, Z irányban 200 mm a legnagyobb használható nyomtatási méret. Felbontása az X tengely mentén 600 dpi, az Y tengely mentén 300 dpi, a Z tengely mentén pedig 1600 dpi [7].

2.3. A felhasznált anyagok

A nyomtatás alapanyaga IORA Support 705 támaszanyag, valamint IORA Model White RGD835 modellanyag (3. ábra) [8, 9].

Az IORA Support 705 támaszanyag kiváló stabilitást biztosít annak érdekében, hogy a modellek megőrizze formájukat és integritásukat a teljes nyomtatás alatt. A támaszanyag segítségével könnyedén készíthetünk bonyolult és összetett testeket. A nyomtatás befejezését követően vízsugár segítségével könnyedén eltávolítható a nyomtatott alkatrészről, így tiszta és hibátlan végeredményt biztosítva [8].

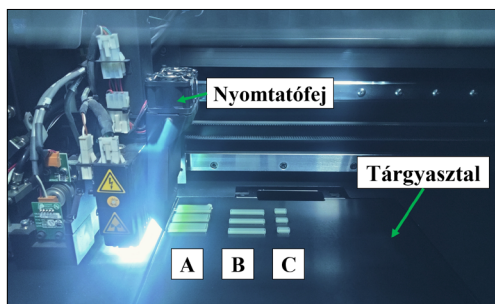
Az IORA Model RGD835 anyagok sokoldalú és megbízható 3D-s nyomtatási alapanyagok, amelyek a PolyJet fotopolimerek családjába tartoznak, és széles körben alkalmazhatók különböző iparágakban. Nagy opacitással és szakítószilárdsággal rendelkeznek, így ideálisak olyan modellek készítésére, amelyek finom részleteket igényelnek, mint például a különféle burkolatok, rögzítők és prototípusok. A PolyJet eljárás nagy felbontása biztosítja, hogy a nyomtatott alkatrészek rendkívül pontosak és kiváló felületi minőségűek, ami különösen fontos a végfelhasználói termékek és a precíziós alkatrészek előállításakor. A modellanyag legfontosabb tulajdonságait a 2. táblázat összegzi [9].

2.4. Próbatelemek gyártása

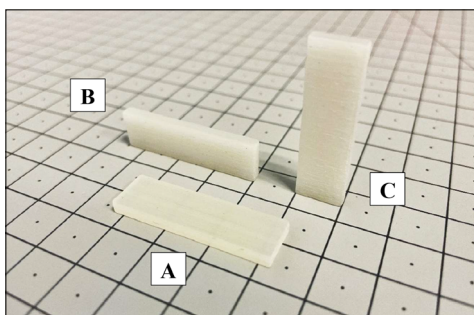
A kiváló minőségű (HS) módban nyomtatott próbatetek esetében a rétegvastagság 16 µm. A próbateteket minden irányból támaszanyag vette körbe. A nyomtatási idő 4 óra 40 perc volt.

2. táblázat. IORA Model White RGD835 modellanyag mechanikai tulajdonságai [1]

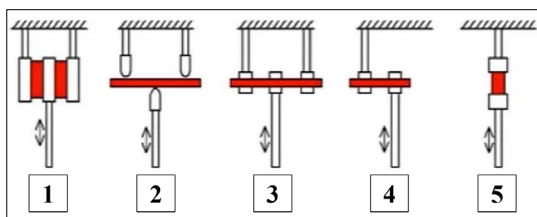
Megnevezés	Érték	Szabvány
Young-modulus	2000–3000 MPa	ASTM D638
Szakitószilárdság	50–65 MPa	ASTM D638
Szakadási nyúlás	13–24%	ASTM D638
Izod-féle ütőszilárdság bemetszett, A 23 °C)	20–30 J/mm ²	ASTM D256
Hajlítószilárdság	75–110 MPa	ASTM D790
Hajlítási modulus	2200–3200 MPa	ASTM D790
Behajlási hőmérséklet (HDT) @ 0,45 MPa	46–51 °C	ASTM D648
Behajlási hőmérséklet (HDT) @ 1,82 MPa	46–51 °C	ASTM D648
Üvegesedési hőmér- séklet (Tg)	52–54 °C	ASTM D4065



4. ábra. Objet Eden 250 a nyomtatási folyamat közben



5. ábra. Az elkészült próbatetek tisztítás után



6. ábra. DMTA-vizsgálati módok: 1. nyírás; 2. hárompontos hajlítás; 3. kétoldali megfogás; 4. egyoldali megfogás; 5. húzás/összenyomás [10]

A kiváló minőségű (HQ) üzemmód esetén a rétegvastagság 29 μm , így a program a teljes nyomtatást 1215 rétegre bontotta, melynek gyártása 2 óra 40 percet vett igénybe (**4. ábra**).

Az elkészült próbatetek könnyedén eltávolíthatók a tárgyasztalról egy célszerszám segítségével, majd az ezeket körülvevő támaszanyag vízcsap alatt leoldható. A legyártott próbatetek az **5. ábrán** láthatók.

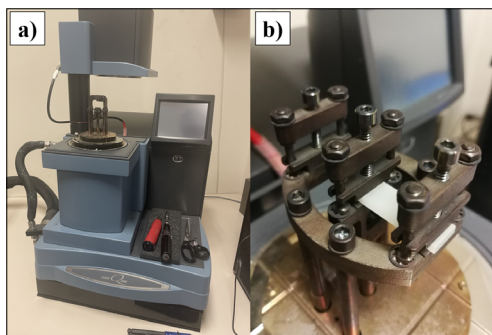
A nyomtatást követően a PolyJet eljárás esetében nincs szükség a próbatetek utólagos levilágítására, szemben a hagyományos fotopolimerizációs eljárásokkal.

3. Vizsgálati módszer

A műanyag alkatrészek gyakran vannak dinamikus igénybevételeknek kitéve. Ezért fontos, hogy megismerjük a viselkedésüket periodikus ismétlődő terhelés esetén is. A DMTA-vizsgálatok során a próbatestre ható feszültséget és annak frekvenciáját állandó értéken tartjuk. A hőmérsékletet meghatározott módon változtatjuk, és mérjük a kialakuló deformációt. Ezek alapján a nyomtatott termék anyagának mechanikai jellemzői meghatározhatók. Az anyagvizsgálat TA DMTA Q800-as berendezésen, egyoldali megfogással történt (**6. ábra**)/4) [1, 10].

A próbatestet, melynek mérete 35×10×3 mm, két csavaros megfogóban rögzítettük ~1 Nm nyomatékkal (**7. ábra**). A munkadarab két rögzítése közötti távolság 17,2 mm.

A DMTA-mérés során a próbatest egyik vége rögzített helyzetben van, míg a másikat különböző frekvenciákon állandó amplitúdóval rezgetjük, eközben a hőmérsékletet lépcsőzetesen emeljük. A vizsgálat megkezdése előtt próbamérések segítségével határoztuk meg a kísérlethez legalkalmasabb beállítási paraméterek (amplitúdó, frekvenciatartomány, hőmérséklet-tartomány).



7. ábra. Vizsgálóberendezés: a) TA DMTA Q800 b) rögzített próbatest

Esetünkben az ideális rezgetési amplitúdó $10\ \mu\text{m}$. A hőmérsékleti tartomány $40\text{--}90\ ^\circ\text{C}$, a melegítés $2\ ^\circ\text{C}$ -os lépésekben történt, 1 perces hűn tartással. A próbatest minden egyes hőmérsékleten, 11 frekvencián rezgett $1\text{--}21\ \text{Hz}$ között, lineáris $2\ \text{Hz}$ -es lépésekben.

4. Eredmények

A hat különféle próbatestet (A, B, C, valamint HS és HQ üzemmód) egyesével megmértük a fentiekben leírtaknak megfelelően. Jelen kutatás az üvegesedési hőmérsékletre és a veszteségi tényezőre koncentrált, így elsősorban ezeket az adatokat ábráztuk.

4.1. Az üvegesedési hőmérséklet frekvenciafüggése

A mérési adatok alapján minden egyes frekvenciánál meg kell keresni a maximális $\tan(\delta)$ értéket és az ahhoz tartozó hőmérsékletet. Ezeket a hőmérsékleti értékeket táblázatban rögzítettem minden próbatest és frekvencia esetén, majd azokat frekvenciánként átlagoltam a három különböző orientációjú próbatestre. Az analízist mindkét nyomtatási üzemmód (HS és HQ) esetében el kellett végezni. Az eredmények a 8. ábrán láthatók.

A diagramon megfigyelhető, hogy az üvegesedési hőmérséklet (T_g) a gerjesztési frekvencia függvényében változik. A frekvencia növekedésével az anyag üvegesedési hőmérséklete emelkedett, ami mindkét nyomtatási üzemmódnál észlelhető volt, akár nagy sebesség (HS), akár kiváló minőség (HQ) esetén. Továbbá, a nagy sebességgel gyártott próbatestek üvegesedési hőmérséklete körülbelül $2\ ^\circ\text{C}$ -kal nagyobb, mint a növelt minőségű próbatesteké.

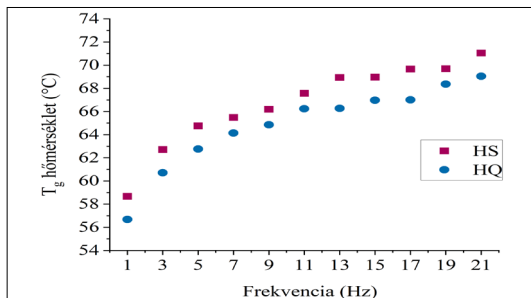
4.2. A nyomtatási irányok hatása az üvegesedési hőmérsékletre

A mérési adatokból kirajzolható az egyes próbadarabok $\tan(\delta)$ görbéje az $1\ \text{Hz}$ -es frekvenciához. A 9. és a 10. ábrán látható, hogy mindkét üzemmód esetén kismértékben, de eltérnek a $\tan(\delta)$ csúcsok a különböző építési irányú próbatesteknél, ezzel az üvegesedési hőmérsékletek is eltolódnak. Legkisebb értékek nagy sebességű nyomtatás esetén az A építési irányú próbatestnél tapasztalhatók, a legnagyobbak pedig C irányú próbatesteknél.

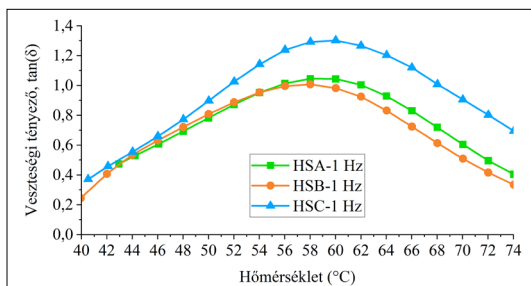
A kiváló minőségű (HQ) üzemmód esetén ezzel ellentétes hatás tapasztalható, azaz az A jelű próbatest mutatja a legnagyobb T_g hőmérsékletet, míg a B és C próbatestek a kisebb értékeket (10. ábra).

4.3. A nyomtatási minőség hatása az üvegesedési hőmérsékletre

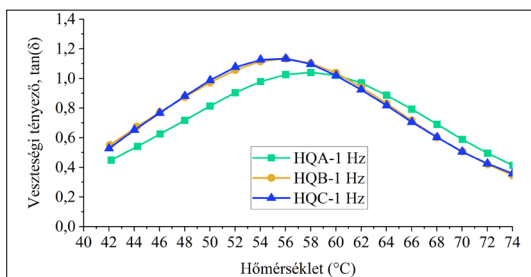
A nyomtatási üzemmódok hatását vizsgálva az üvegesedési hőmérsékletből az olvasható le, hogy az „A” jelű próbatest esetében nincs hatása a nyomtatási üzemmódnak (11. ábra).



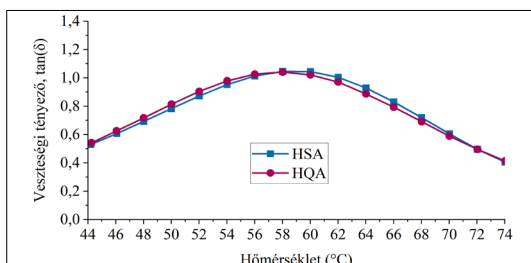
8. ábra. Az üvegesedési hőmérséklet frekvenciafüggése



9. ábra. A veszteségi tényező változása a hőmérséklet függvényében, HS üzemmódban



10. ábra. A veszteségi tényező változása a hőmérséklet függvényében, HQ üzemmódban



11. ábra. A veszteségi tényező alakulása $1\ \text{Hz}$ frekvencián: „A” jelű próbatest

Ugyanakkor a „B” jelű próbatestenél már látható eltérés a két üzemmód között. A kiváló minőségű (HQ) próbatest Tg hőmérséklete 2 °C fokkal kisebb (12. ábra).

Hasonló, de valamivel nagyobb eltérés látható a „C” jelű próbatest esetében, ahol 4 °C-kal nagyobb Tg hőmérséklet jellemzi a kiváló minőségű (HQ) üzemmódban nyomtatott próbatestet (13. ábra).

Az értékekben a fenti tendencia a kisebb, illetve a nagyobb frekvenciákon is látható.

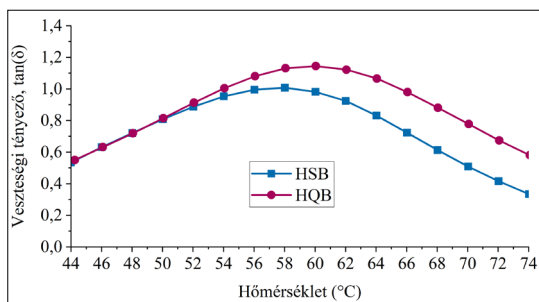
4.4. Nyomatatási üzemmód és építési irányok hatása a veszteségi tényezőre

A hőmérséklet-veszteségi tényező diagramokból látható, hogy a $\tan(\delta)$ görbék nemcsak a hőmérsékleti tengely mentén, hanem maximális értékeikben is eltérnek egymástól. A veszteségi tényező az elvesztett és a rugalmasan tárolt energiának a hányadosa. Az alábbi diagramokról leolvasható, hogy a $\tan(\delta)$ csúcserkéi között az építési irány és nyomatatási üzemmódok függvényében egyaránt különbség van (14. és 15. ábra).

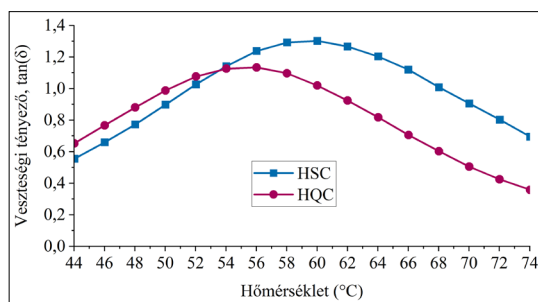
A „C” jelű próbatestek bírnak a legnagyobb $\tan(\delta)$ csúcserkéekkel (legkevésbé rugalmas),

míg az „A” jelűek a legkisebbel (legrugalmasabb). A $\tan(\delta)$ csúcserkéit a frekvencia befolyásolja. A nyomatatási üzemmódokat összevetve az látható, hogy a kiváló minőségű (HQ) próbatestek értékeinek kisebb a szórása. A mérések alapján megállapítható, hogy a nyomatatási orientáció és a rétegvastagság kihat a próbatestek termomechanikai tulajdonságaira.

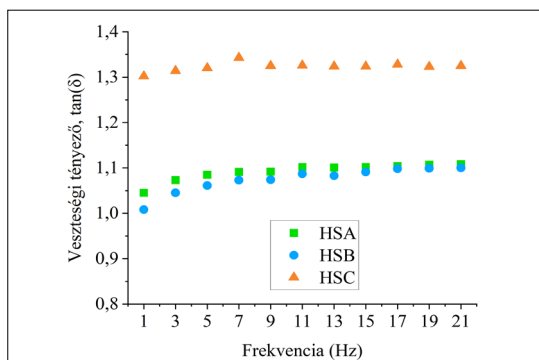
A vizsgálati frekvencia hatására az üvegesedési hőmérséklet eltolódik a nagyobb hőmérsékletek irányába. A nyomatatási orientáció hatása kismértékben, de befolyásolja az üvegesedési hőmérsékletet, azonban nem látható tendencia az eredményekben. A nyomatatási üzemmódok összehasonlítása során az „A” jelű próbatestek kivételével az látható, hogy a kiváló minőségű (HQ) próbatestek esetében kisebb volt az üvegesedési hőmérséklet. A veszteségi tényezők csúcserkéit vizsgálva megfigyelhető, hogy a legkisebb értékek az „A”, a legnagyobbak pedig a „C” jelű próbatestek esetén tapasztalhatók. A kapott eredmények alapján kimondható, hogy a termékek anizotrop tulajdonságokkal bírnak.



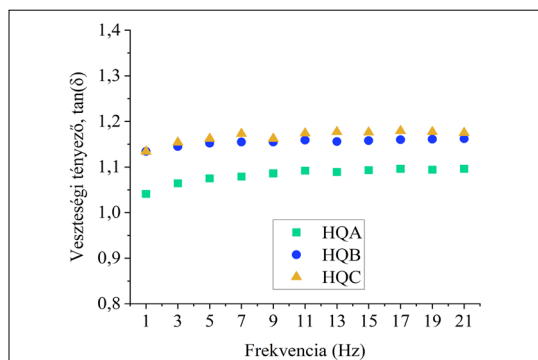
12. ábra. A veszteségi tényező alakulása Hz frekvencián: „B” jelű próbatest



13. ábra. A veszteségi tényező eloszlása 1 Hz frekvencián: „C” jelű próbatest



14. ábra. Maximális veszteségi tényező értékek a HS üzemmódban nyomtatott próbatesteknél



15. ábra. Maximális veszteségi tényező értékek a HQ üzemmódban nyomtatott próbatesteknél

5. Következtetések

A kutatás a PolyJet 3D nyomtatási eljárással készült próbatestek mechanikai tulajdonságait vizsgálta, különös figyelmet fordítva a nyomtatási orientációra és a rétegvastagság hatására. A vizsgálatok során megállapították, hogy az orientáció és a rétegvastagság jelentős hatással van az üvegesedési hőmérsékletre és a veszteségi tényezőre, amelyek az anyag mechanikai viselkedését befolyásolják. A kiváló sebességgel (HQ) készült próbatesteknél magasabb üvegesedési hőmérsékletet figyeltek meg. A kutatás hozzájárulhat a gyártási paraméterek finomhangolásához, lehetővé téve a PolyJet technológia szélesebb körű ipari alkalmazását.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] ISO 14692-1:2018. (letöltve: 2025. március 13.)
<https://www.iso.org/standard/62256.html>
- [2] Ficzer Péter: *Gyors prototípus numerikus és kísérleti szilárdsági analízise* (letöltve: 2025. március 13.)
<https://repozitorium.omikk.bme.hu/items/a8911f7c-6529-465d-b544-0f50cd7db8cb>
- [3] Sanders, J., Wei, X. & Pei, Z.: *Experimental investigation of polyjet 3D printing process: Effects of orientation and layer thickness on thermal glass transition temperature*. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 59377. (2019) V02AT02A064.
<https://doi.org/10.1115/IMECE2019-11999>
- [4] Márk, P. & Sándor, M.: *3D nyomtatási anyagok mechanikai tulajdonságainak meghatározása különböző nyomtatási irányokban*. Biomechanica Hungarica, 11/1. (2018)
- [5] Liu, M. L., Reichl, K. K. & Inman, D. J.: *Complex modulus variation by manipulation of mechanical test method and print direction*. In: Mechanics of Additive and Advanced Manufacturing: Proceedings of the 2017 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, Springer International Publishing, 9. (2017) 5–11.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-62834-9_2
- [6] Reichl, K. K. & Inman, D. J.: *Dynamic mechanical and thermal analyses of Objet Connex 3D printed materials*. Experimental Techniques, 42/1. (2018) 19–25.
<https://doi.org/10.1007/s40799-017-0223-0>
- [7] Falk György: PolyJet a Rapid Prototyping új dimenziója (letöltve: 2025. március 13.)
<http://www.sasovits.hu/cnc/irodalom/3d/PolyJet.pdf>
- [8] Stratasys Eden250 3D Printer Support. (letöltve: 2025. március 13.)
<https://support.stratasys.com/en/printers/polyjet-legacy/eden250>
- [9] iSQUARED Stratasys Refill – IORA Model White – 1kg (letöltve: 2025. március 13.)
<https://www.am-material-marketplace.com/product/iora-model-white-1-kg/>
- [10] Polimerek dinamikus mechanikai vizsgálata (DMTA) (letöltve: 2025. március 13.)
<https://docplayer.hu/93271637-3-polimerek-dinamikus-mechanikai-vizsgalata-dmta.html>
- [11] Dr. Molnár Kolos: Anyagismereti alapok (letöltve: 2025. március 13.)
http://www.pt.bme.hu/futotargyak/97_BMEGEPTBM01_2021oszi/M0T0-Anyagismere-ti%20alapok%20101.pdf
- [12] Singh, R.: Process capability study of polyjet printing for plastic components. Journal of Mechanical Science and Technology, 25. (2011) 1011–1015.
<https://doi.org/10.1007/s12206-011-0203-8>
- [13] Mueller, J., Shea, K. & Daraio, C.: *Mechanical properties of parts fabricated with inkjet 3D printing through efficient experimental design*. Materials & Design, 86. (2015) 902–912.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.129>



Környezetbarát tenzidek kőolaj-kihozatali célra való felhasználhatóságának vizsgálata

Investigation of the Applicability of Environmentally Friendly Surfactants for Oil Recovery

Gerbovits Ditta Adrienn,¹ Nagy Roland,² Puskás Sándor³

¹ Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, MOL Ásványolaj- és Széntechnológiai Intézeti Tanszék, Veszprém, Magyarország, gerbovits.ditta.adrienn@mk.uni-pannon.hu

² Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, MOL Ásványolaj- és Széntechnológiai Intézeti Tanszék, Veszprém, Magyarország, nagy.roland.dr@mk.uni-pannon.hu

³ MOL Nyrt, Csoportszintű Olajipari Vegyi Technológiák, Algyő, Magyarország, spuskas@mol.hu

Abstract

This study investigates the feasibility of producing surfactants (surface-active agents) from alternative, environmentally friendly raw materials for application in enhanced oil recovery (EOR) processes. The primary objective is to identify and evaluate sustainable feedstocks capable of replacing conventional, widely used surfactant materials that often pose environmental concerns. The paper provides a detailed overview of the analytical and physicochemical methods employed in the characterization of the synthesized surfactants, focusing on key parameters such as surface tension reduction, stability, and emulsification performance. The physicochemical properties of the newly developed surfactants are compared with those of commercially available agents currently used in EOR applications. The ultimate goal of this research is to support the development of sustainable and eco-conscious alternatives that maintain or improve oil recovery efficiency while minimizing environmental impact.

Keywords: *enhanced oil recovery, sustainability, environmentally friendly, surfactant.*

Összefoglalás

Jelen cikkben a kőolaj-kitermelés hatékonyságát növelő eljárásokhoz is alkalmazható tenzidek (felületaktív anyagok) potenciális, környezetbarát alapanyagból történő előállításának eredményessége képezi a vizsgálat tárgyát. A kutatás célja olyan alternatív tenzid-alapanyagok azonosítása és értékelése, amelyek kiválthatják a jelenleg széles körben alkalmazott, de sok esetben környezeti szempontból problémás nyersanyagokat. A cikk részletesen bemutatja a vizsgálat során alkalmazott analitikai és fizikai-kémiai vizsgálati módszereket, valamint ismerteti a szintetizált felületaktív anyagok főbb tulajdonságait, mint például a felületi feszültségre gyakorolt hatásukat, stabilitásukat és emulgeáló képességüket. Az újonnan előállított tenzidek jellemzőit összehasonlítjuk a már kereskedelmi forgalomban lévő anyagokéval. A vizsgálatok célja hosszú távon olyan fenntartható megoldások előmozdítása, amelyek hozzájárulnak a kőolajipar környezetbarátabb működéséhez anélkül, hogy csökkentenék a kihozatali hatékonyságot.

Kulcsszavak: *kőolaj-kihozatalt növelő eljárás, fenntarthatóság, környezetbarát, felületaktív anyag, tenzid.*

1. Bevezetés

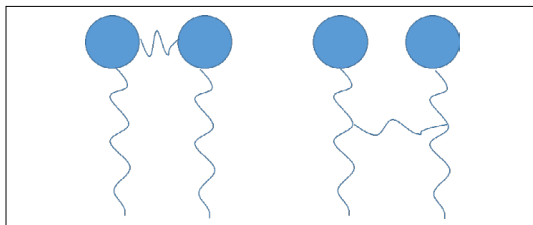
A globális energiaigények hatására kulcsfontosságú törekvés a kőolajtelepekben, rezervoárookban lévő kőolaj minél nagyobb határfokkal történő kitermelése. Fokozott kőolaj-kihozatali eljárás

(angolul: Enhanced Oil Recovery, EOR) alkalmazására akkor kerül sor, ha a tárolóközetben csapadózott, maradék kőolajat a hagyományos kihozatali eljárásokkal nem tudjuk a felszínre hozni, ezért ebben az esetben valamilyen segédanyag

alkalmazása szükséges [1]. Segédanyag használatával a porózus közetben (tározókban) lévő kőolaj kémiai, fizikai-kémiai tulajdonságait megváltoztatjuk, s ennek hatására a kőolaj mozgékony-sága, mobilitása nagyobb, s a felszínre hozatala is könnyebb lesz [2]. A módszer alapja, hogy az alkalmazott segédanyagok azokra az erőkre hatnak, melyek a kőolajat a tározóközet pórusaiban tartják, és gátolják az onnan való kiáramlást [3]. Az EOR-technológiák során többféle segédanyagot használhatnak, ezek alapján beszélhetünk termikus módszerről, gázbesajtolásról, kémiai eljárásról vagy egyéb segédanyagot alkalmazó eljárásról. Az alkalmazott kitermelési eljárás módja függ a tározó geológiai tulajdonságaitól, a kőolaj fizikai és kémiai jellemzőitől és a rétegvíz összetételétől [4, 5, 6]. Az alkalmazott módszerek csoportosítására az 1. ábra szolgál [7]:

A munkánk további részében a kémiailag növelt hatékonyságú kőolaj-kitermelési eljárások (cEOR) során alkalmazott tenzidek tulajdonságait elemezzük. A kémiai eljárás segédanyagai, ahogy az 1. ábrán is látható, a polimerek, tenzidek, alkáli anyagok, lúgok és a habosított anyagok [8]. Együttes alkalmazásuk során szinergikus hatást is kifejthetnek. Az alábbiakban a kőolaj-kihozatali eljárásokban alkalmazott tenzideket vizsgáljuk, és az eddig használt tenzidek alapanyagait helyettesítjük környezetbarát, növényi olaj alapanyaggal.

A szintézisek során célunk gemini típusú tenzidek előállítása és vizsgálata, melyek a tenzidek



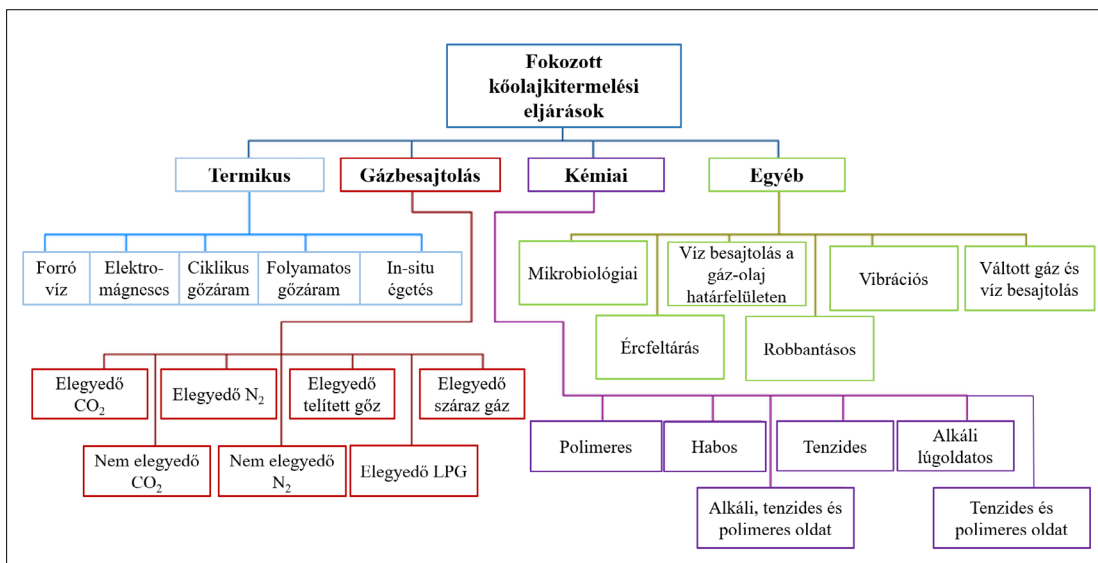
2. ábra. A gemini tenzidek szerkezeti felépítése

egy speciális csoportját alkotják. A gemini típusú tenzidek dimer szerkezetű vegyületek. Az egyszerű tenzidekkel ellentétben két hosszú, hidrofób szénhidrogénláncuk és két hidrofil fejrészük van, mely egységeket egy úgynevezett távtartó köti össze. Sematikus szerkezetük a 2. ábrán látható.

2. A felhasznált alapanyagok

A vizsgálat tárgya a MOL Nyrt. által kifejlesztett, gyártott és forgalmazott, növényi alapú, KOMAD-710 jelű tenzid, a kókuszolaj-alapú, Empilan 2502 jelű tenzid, a Sigma-Aldrich által forgalmazott, SPAN80 jelű, olajsav-alapú tenzid és két saját, napraforgó-alapú, kísérleti gemini tenzid (ZMG-1 és ZMG-3 jelű kísérleti tenzidek), valamint mindezek fizikai és kémiai tulajdonságai és hatásvizsgálatuk eredménye.

A kísérleti munka, mely a kereskedelmi forgalomban kapható felületaktív anyagok fizikai, kémiai tulajdonságait és hatásvizsgálatát elemzi, az 1. táblázatban látható. A vizsgált tenzidek mindegyike nemionos csoportba sorolható.



1. ábra. Fokozott kőolaj-kihozatali eljárások során alkalmazott segédanyagok (LPG = cseppfolyós pébégáz) [7]

1. táblázat. A kereskedelmi forgalomban kapható tenzidek és környezetbarát alapanyagai

Tenzid jele	KOMAD-710	Empilan 2502	SPAN80
Alapanyaga	Repceolaj	Kókuszszír	Szorbit
Forgalmazó	MOL Nyrt.	Huntsman	Sigma-Aldrich

A saját, kísérleti alapú felületaktív anyagok növényi olaj alapú, gemini típusú nemionos tenzidek. A következőkben bemutatott kísérleti tenzidek szintézise nagyban hasonló, különbség az alkalmazott távtartó csoportok szénatomszámában van, de mindkét esetben dibrom-alkán volt az alkalmazott vegyület.

A kísérleti tenzidek előállításának első lépése glicerín-észter intermediát előállítása volt átszterezezéssel, növényi olajból és glicerínből. Második lépésként a glicerín-észter intermediátot fázistranszfer katalizátor segítségével dibrom-alkánnal reagáltattuk lúgos környezetben. A reakciók 100–250 °C hőmérsékleten és környezeti nyomáson mentek végbe. A terméket vízmentes nátrium-szulfáttal szárítottuk [9].

3. Módszerek

A tenzidek fizikai és kémiai tulajdonságait és a hatásvizsgálatokat az alábbi módszerek alkalmazásával határoztuk meg és végeztük el.

3.1. Sűrűség és dinamikai viszkozitás

A sűrűség és dinamikai viszkozitás 40 °C-on való vizsgálata SVM 3000 Stabinger Viscometer típusú készülékkel történt.

3.2. A pH-érték meghatározása

A pH-értéket a tenzidek 5 g/l-es, desztillált vizes oldatában mértük a Mettler Toledo által gyártott, SevenCompact Duo nevű készülékkel.

3.3. Az oldhatóság meghatározása

A tenzidek vízben való oldhatóságát szintén 5 g/l-es, desztillált vizes oldatukban vizsgáltuk szemrevételezéssel és transzmittancia mérésével. A transzmittancia vizsgálata Avantes AvaSpec-DUAL spektrofotométerrel történt.

3.4. A dermedéspont meghatározása

A dermedéspontot Koehler gyártmányú, automata dermedés- és folyáspontmérővel vizsgáltuk.

3.5. A vízsám meghatározása

A vizsgálat a felületaktív vegyületek hidrofíli-pofil jellegének meghatározására szolgál, ezáltal információt adva a tenzidek emulgeáló hatásáról és a sötétítő képességükről. A vízsámot titrálási módszerrel határoztuk meg. A mérés során 1 g tenzidet feloldottunk 30 cm³ ciklohexán-aceton 4:96 arányú elegyében, majd desztillált vízzel titráltuk az elegyet meg nem szűnő zavarosodásig.

3.6. Az olajkiszorító hatás vizsgálata

Az olajkiszorító hatás vizsgálata vékonyréteg-kromatográfiás módszerrel történik. A mérés előkészítéseként tiszta, száraz üveglapot algyői porított kőzet anyagának kloroformos szuszpenziójába mártottunk. Ennek hatására száradás után az üveglapon egy vékony porítottkőzet-réteg képződött. Az üveglap aljától körülbelül 2 cm-re Algyő 892 jelű kőolajból egy cseppet vittünk fel. A tenzidekből 5 g/l-es oldatot készítettünk algyői szűrt rétegvízzel. A továbbiakban vizsgálócsőbe mértünk 15 cm³-t a készített oldatokból, és az előkészített üveglapokat behelyeztük a csőbe. Lezártuk a vizsgálócsöveket, majd a mintákat 60 °C-on 3 órán keresztül szárítószekrényben tároltuk. A vizsgálati idő leteltével az olajcsepp futása lemérhető a cseppentés helye és az olajfolt széle közötti távolság alapján. Az eredményt mm-ben adtuk meg.

3.7. Az emulgeáló (szolubilizáló) hatás vizsgálata

Az emulgeáló hatás vizsgálata ADEM automata emulgeálóberendezéssel történt. A vizsgálat során a készülékhez tartozó mérőhengerekbe ki-mértünk 40 cm³, 5 g/l koncentrációjú algyői szűrt rétegvízzel készített tenzidoldatot, majd mindegyik mintához hozzáadtunk 40–40 cm³ Algyő 892 jelű kőolajat. A mintákat 2 percig 1500 1/min fordulatszámmal kevertettük, majd félóra elteltével vizsgáltuk a keletkezett emulziót (elegyet).

3.8. A határfelületi feszültség vizsgálata

A határfelületi feszültség (angolul: interfacial tension, IFT) meghatározása Krüss SDT gyártmányú Spinning Drop tenziométerrel történt. A készülékben lévő vékony üvegcsövet (kapilláriszt) a készülék tengelye körül megforgatja, így a kapillárisban lévő olajcsepp forgástengelyétől mért sugara alapján meghatározható a kapillárisban lévő tenzidoldat és a kőolajcsepp közötti határfelületi feszültség. A vizsgálat során szintén Algyő 892 jelű kőolajat és a tenzidek 5 g/l-es, algyői szűrt rétegvízzel készített oldatát használtuk.

2. táblázat. A vizsgált tenzidek mért fizikai és kémiai tulajdonságai

Vizsgált tulajdonság / Tenzid jele	KOMAD- 710	Empilan 2502	SPAN80	ZMG-1	ZMG-3
Sűrűség (g/cm ³) 40°C	0,9701	0,9800	0,9860	1,2201	1,2223
Dinamikai viszkozitás (mPa·s) 40°C	148,8	450	1285	1,6570	1,5947
pH-érték (5 g/l-es deszt. vizes oldat)	11,21	9,74	Nem mérhető	12,83	11,83
Folyáspont/dermedéspont (°C)	-25	9	1	-15	-16
Oldhatóság (5 g/l-es deszt. vizes oldat)	Oldható	Részlegesen oldható	Nem oldható	Oldható	Oldható
Transzmittancia (%) (5 g/l-es deszt. vizes oldat)	34	51	69	23	28
Vízszám (cm ³)	10,3	13,5	4,30	13,0	11,65

3. táblázat. A vizsgált tenzidek hatásvizsgálatainak eredménye

Vizsgált tulajdonság / Tenzid jele	KOMAD- 710	Empilan 2502	SPAN80	ZMG-1	ZMG-3
Olajkiszorító hatás (vékonyréteg-kromatográfiás módszerrel) (mm)	21	12	10	26	20
Emulgeáló (szolubilizáló) hatás, térfogatarány (%)	30	22	23	41	63
Határfelületi feszültség (mN/m)	6,18	8,67	10,2	7,14	5,3

4. Eredmények

A következőkben a tenzidek fizikai és kémiai vizsgálata során kapott értékek találhatók. A **2. táblázatban** a vizsgált tenzidek fizikai és kémiai tulajdonságai, a **3. táblázatban** pedig a hatásvizsgálatok eredményei láthatóak.

5. Következtetések

A kísérleti munka célja az volt, hogy a már kereskedelmi forgalomban kapható felületaktív anyagok helyettesítése végett a környezetre kevésbé ártalmas, megújuló vagy megújítható alapanyagokból állítsunk elő a kőolaj-kitermelésben is használható tenzideket.

A mérési eredmények alapján látható, hogy a ZMG-1 jelű kísérleti tenzid a vékonyréteg-kromatográfiás módszerrel mért olajkiszorító hatásfoka a legnagyobb a mért értékek közül, az emulgeáló hatás vizsgálata esetében a forgalomban lévő tenzidekhez képest mindegyik esetben kiemelkedő az eredmény, a határfelületi feszültség vizsgálata esetében pedig nagyságrendileg illeszkedik a többi tenzid értékeihez.

A ZMG-3 jelű kísérleti tenzid olajkiszorítási vizsgálata során mért eredmény az Empilan 2502 és SPAN80 jelű tenzidekhez képest majdnem kétszer akkora távolságra „futott” a kőolajcsepp, a KOMAD-710 jelű tenzidhez viszonyítva pedig hasonlóan jó eredményt ért el.

Az emulgeáló hatás vizsgálata során a ZMG-3 jelű kísérleti tenzid eredménye a legkiemelke-

dőbb. A határfelületi feszültség értéke pedig szintén kedvezőbb a többi vizsgált tenzid esetében mért határfelületi feszültséghez képest.

Összességében a tenzidek előzetes hatásvizsgálata alapján a kísérleti tenzidek hatásfoka hasonlóan jó, vagy még kiemelkedőbb tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a már forgalomban lévő felületaktív anyagok.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Gbadamosi, A. O., Junin, R., Manan, M. A. et al.: *An overview of chemical enhanced oil recovery: recent advances and prospects*. International Nano Letters, 9. (2019) 171–202.
<https://doi.org/10.1007/s40089-019-0272-8>
- [2] Wan-Li K., Bo-Bo Z., Issakhov M., Gabdullin M.: *Advances in enhanced oil recovery technologies for low permeability reservoirs*. Petroleum Science, 19/4. (2022)
<https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.06.010>
- [3] Barman B. N., Cebolla V. L., Mehrotra A. K., Mansfield C. T.: *Analytical Chemistry. Petroleum and Coal*, 73. (2001) 2791–2804.
- [4] Agi A., Junin R., Syamsul M. F., Chong A. S., Gbadamosi A.: *Intermittent and short duration ultrasound in a simulated porous medium*. Petroleum, 5/ 1. (2019) 42–51.
<https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.03.012>
- [5] Gbadamosi A., Patil S., Kamal, M. S., Adewunmi A. A., Yusuff A. S., Agi A., Oseh J.: *Application of Polymers for Chemical Enhanced Oil Recovery. A Review*. Polymers 14. (2022) 1433.
<https://doi.org/10.3390/polym14071433>

- [6] Tavakkoli O., Kamyab H., Shariati M., Mohamed A. M., Junin R.: *Effect of nanoparticles on the performance of polymer/surfactant flooding for enhanced oil recovery. A review*. Fuel, 312. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122867>.
- [7] Gurgel A., Moura M. C., Castro T. N. D., Barros Neto E. L., Dantas Neto A. A.: *A review on chemical flooding methods applied in enhanced oil recovery*. Brazilian Journal of Petroleum and Gas, (2008), 2.
- [8] Samanta A., Bera A., Ojha K. et al.: *Comparative studies on enhanced oil recovery by alkali-surfactant and polymer flooding*. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2. (2012) 67–74. <https://doi.org/10.1007/s13202-012-0021-2>
- [9] Pal N., Kumar N., Verma A., Ojha K., Mandal A.: *Performance Evaluation of Novel Sunflower Oil-based Gemini Surfactant(s) with different Spacer Lengths*. Application in Enhanced Oil Recovery, Energy&Fuels, 32. (2018) 11344–11361. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b02744>



Szálpaplanok előállítása újrahasznosított PET-palackból

Production of Fibre Mats from Recycled PET Bottles

Kántor József,¹ Gergely Attila Levente²

¹ Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, kantorjosef@ms.sapientia.ro

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

Abstract

The excessive use of polymer materials in the packaging industry and improper waste management greatly contribute to environmental pollution. The recycling of this plastic waste is key to improving sustainability. In this paper the production of non-woven fibre mats from PET bottles was studied, which can be used in air filtration. The fibres were generated using centrifugal spinning. The potential to substitute the common solvents of PET with less harmful ones was also investigated.

Keywords: PET, centrifugal spinning, microfibre, recycling.

Összefoglalás

A műanyagok használata a csomagolóiparban és a hulladék csomagolóanyag nem megfelelő kezelése nagymértékben hozzájárul a környezetszennyezéshez. A körforgásos és fenntartható gazdaság egyik feltétele a keletkezett műanyag hulladék újrahasznosítása. A jelen kutatásban a PET-palackok újrahasznosíthatóságát vizsgáljuk, olyan nemszótt, szálás anyagszerkezetekké, melyek felhasználhatóak szűrői alkalmazásokban, például levegőszűrésre. A szálpaplanok előállítására centrifugális szálképzési eljárást használtunk. Továbbá megvizsgáltuk a folyamatban használt oldószerek helyettesíthetőségét a környezetre kevésbé káros oldószerekre.

Kulcsszavak: PET, centrifugális szálképzés, mikroszálak, újrahasznosítás.

1. Bevezetés

A polietilén-tereftalát (PET) a legnagyobb mennyiségben előállított polimerek között a 6. helyet foglalja el, évente mintegy 56 millió tonnával. Ennek a mennyiségnek nagyjából a 40%-át a csomagolóiparban (fóliák, palackok, dobozok formájában), és egy másik 45%-át a textiliparban használják fel. A termékek jellegéből adódóan nagy mennyiségű hulladék is keletkezik [1].

A PET újrahasznosítására több módszer létezik, ezek közül az egyik a szálképzés. Nemszótt szálás szövedékek előállítására a legelterjedtebb eljárás az elektrosztatikus szálképzés. Más lehetséges módszer az ömledékes szálképzés és a centrifugális szálképzés. A szálképzésre irányuló törekvések egyik fő szempontja a minél kisebb szálátmérők

elérése [2]. Az ömledékes szálképzés egyáltalán nem igényel oldószert, viszont a berendezés bonyolultabb felépítésű, és a PET esetében a létrehozott szálak átlagos átmérője egy nagyságrenddel nagyobb [3].

A centrifugális szálképző eljárás során egy, a polimeroldatot tartalmazó kamrát 4000–15 000 1/min fordulatszámmal forgatnak meg. A forgómozgás következtében a polimeroldat radiálisan elhelyezett kapillárisokon áramlik ki, létrehozva egy polimeroldat-sugarat, mely a kollektor felé halad a centrifugális erő hatására. A folyamat során a polimeroldat-szálból az oldószer elpárolog, és a megszilárdult polimerszálak a kollektoron halmozódnak fel. Az eljárás egyszerűségéhez már laboratóriumi méretek mellett is nagy termelé-

kenység társul. Ráadásul a polimeroldat vezető-képessége nem befolyásolja a folyamatot, és nincs szükség a hagyományos elektrosztatikus szálképző eljárásokra jellemző nagyfeszültség alkalmazására sem [2].

Vo et al. sikeresen gyártott szálakat PET-ből trifluoroecetsav (TFA) és diklórmétán (DCM) 70/30 tömegarányú oldatával, centrifugális szálképzéssel. A kísérleteket különböző kapillárisátmérőkkel (160–340 μm), fordulatszámokon (6000–15 000 1/min) és oldatkoncentrációkkal (5–13%) végezték. A cseppmentes szálak átmérői $0,66 \pm 0,27$ és $4,26 \pm 2,32$ μm között voltak a gyártási feltételektől függően [4].

Mivel a PET részlegesen kristályos szerkezetű, nem oldódik a legtöbb szerves oldószerben. A PET-oldatokat általában savak segítségével készítik, leggyakrabban TFA-val. A szakirodalomban közölt kutatásokban a TFA és DCM 70/30 vagy 50/50 tömegarányú keveréke szerepel mint oldószer [4, 5]. A fluorozott savakkal az a gond, hogy mérgezőek, és lassan bomlanak el természetes körülmények között. A TFA felezési ideje vízi ökoszisztémákban százéves nagyságrendben mozog [6]. Célszerű tehát alternatív oldószerek kikísérletezése.

A polimerek oldhatósága a Hansen-féle oldódási modellel vizsgálható. A modell szerint minden vegyület jellemezhető három, úgynevezett interakciós (oldódási) paraméterrel, amelyek a diszperziós (δD), poláris (δP) és hidrogénkötés (δH) intermolekuláris kölcsönhatások erősségét számszerűsítik. Minél közelebb állnak a polimer és az oldószer oldódási paraméterei, annál jobb az oldékonyság [7].

2. Kísérleti módszertan

2.1. Anyagok

A polietilén-tereftalát (PET) egy ásványvizes palack feldarabolásából származott. A trifluoroecetsav (TFA, Sigma Aldrich, 99%), a fenol (Thermo Scientific, 99%), a diklórmétán (DCM, VWR Chemicals, 99,8%), a dimetil-formamid (DMF, VWR Chemicals, 98%) és a toluol (VWR Chemicals, 99,9%) a gyártótól beszerzett formában kerültek felhasználásra.

2.2. Polimeroldatok készítése

15%-os PET-oldat 15/85 tömegarányú TFA/DCM oldószerkeverékkel, illetve 10, 12,7, 15 és 20%-os PET-oldatok 30/70 TFA/DCM oldószerkeverékkel készültek 20 ml-es fiolákban. Az anyagok fiolába helyezését mágneses keverővel való keverés

követe 24 órán keresztül szobahőmérsékleten. Ezen kívül további oldódási vizsgálatokhoz 10% PET-et adtunk 50/50 fenol/DCM, illetve 55/45 toluol/DMF-keverékhez.

2.3. Centrifugális szálképzés

A centrifugális szálképzést saját építésű berendezéssel végeztük [8]. A radiális kapillárisokkal (25G méretű tűk) ellátott kamrát 4000, 6000, illetve 8000 1/min fordulatszámmal forgatta a villanymotor. A polimeroldatot a fecskendőpumpa tefloncsövön keresztül juttatta be a kamrába 60 ml/min térfogatárammal. A keletkezett szálak gyűjtésére 8 darab, a forgó kamra köré kör alakban, egyenletes osztással elhelyezett acélrúd (kollektor) szolgált. A tű-kollektor távolság 100 mm volt. A szálképzési eljárás 22 °C-os és 40%-os relatív páratartalmú környezetben történt.

2.4. Pásztázó elektronmikroszkópos képalkotás (SEM)

A vizsgálat JEOL JSM-5200 pásztázó elektronmikroszkóppal, 15 kV gyorsítófeszültségen, bevonatolás nélküli mintákon történt. A PET-szálak átmérőinek mérését a mikroszkópos képeken az ImageJ programmal végeztük. Az átlagos szálátmérők mintánként 50 mérés adataiból származnak.

2.5. Oldódási számítások

A PET és az oldószerek számítások során felhasznált Hansen-féle oldódási paraméterei (HSP) megtalálhatóak a szakirodalomban [7].

A HSP-távolságot (R_a) egy gömb sugaraként lehet értelmezni, amely a HSP-térben a polimerre és az oldószerre mutató vektorok különbségéből származik:

$$R_a = \sqrt{4 \cdot (\delta D_2 - \delta D_1)^2 + (\delta P_2 - \delta P_1)^2 + (\delta H_2 - \delta H_1)^2} \quad (1)$$

ahol a δD , δP és δH a diszperziós, poláris, illetve hidrogénkötés kölcsönhatásokat jelentik, míg az 1-es alsó index a polimerre, a 2-es pedig az oldószerre utal. A diszperziós tagot empirikus megállapítások alapján 4-gyel szorozzuk [7].

3. Eredmények

15% PET nem oldódott fel a 15/85 TFA/DCM-oldószerkeverékben 24 órás folyamatos keverés után sem. Ebből kifolyólag nem lehetett szálakat sem képezni belőle. A PET oldékonyságának növelése érdekében a TFA-arányt 30%-ra növeltük, és így 30/70 TFA/DCM-keverékkel próbálkoztunk tovább. 10, 12,7 és 15% PET teljesen beoldódott, míg 20% PET csak részlegesen oldódott be.

Centrifugális szálképzést hajtottunk végre a 10, 12,7 és 15%-os oldatokkal 3 különböző sebességen (4000, 6000 és 8000 1/min). A 10%-os oldat szálakat eredményezett 6000 és 8000 1/min-en, valamint a 12,7%-os 4000 és 6000 1/min-en. A 10%-os oldatból 4000 1/min-en nagyrészt cseppek képződtek, és a 12,7%-os oldatból 8000 1/min-en, valamint a 15%-os oldatból az összes fordulatszámon csak rövid szálszegmensek jöttek létre, amelyek nem gyűltek össze a kollektoron.

A SEM-képek az **1. ábrán** láthatóak. Megfigyelhető, hogy mindegyik mintában a létrejött szálak gyöngyöket tartalmaznak. A gyöngyképződés mértéke csökkenthető a polimer koncentrációjának növelésével. Ez annak tudható be, hogy a koncentrációval az oldat viszkozitása is növekszik, és ezáltal a nagyobb viszkoelasztikus húzófeszültség jobban ellene hat a felületi feszültségnek [9]. Jelen esetben a PET koncentrációjának a 10-ről 12,7%-ra való növelése nem vezetett csökkentett gyöngyképződéshez, és 15%-on már a szálképződés sem valósult meg.

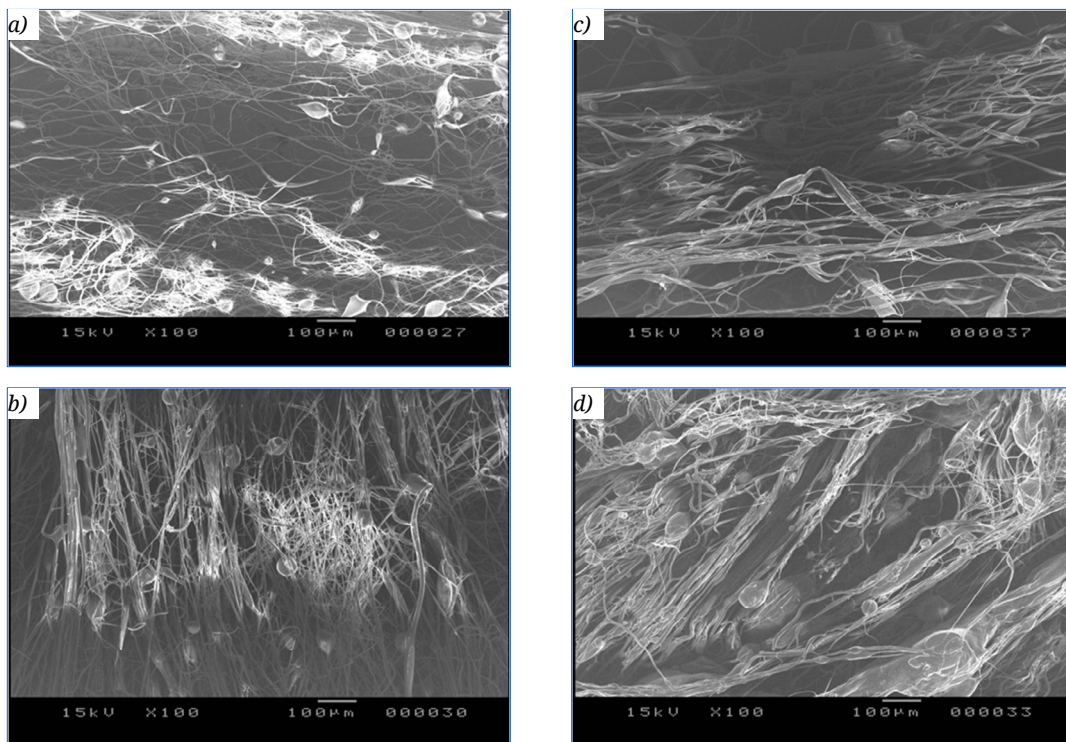
A szálátmérőket a SEM-képeken határoztuk meg, és az összesített eredményeket az **1. táblázat** tartalmazza. Az eredmények azt mutatják, hogy a fordulatszám növekedésével az átlagos szálátmé-

1. táblázat. Átlagos szálátmérők és szórásértékek

Koncentráció	Fordulatszám (1/min)	Szálátmérő (μm)
10%	6000	1,72±0,63
	8000	1,94±0,98
12,7%	4000	1,89±0,84
	6000	2,42±1,37

rő és a szórás is növekedett. Ez a 12,7%-os oldat esetében számottevőbb, itt ~28%-os átmérőbeli növekedés volt megfigyelhető. Az adatok alapján a legkedvezőbb szálképzési feltételek a 10%-os oldatkoncentráció és a 6000 1/min fordulatszám voltak, mivel ez eredményezte mind a legkisebb átlagos szálátmérőt, mind a legkisebb szórást. A szálas szövődékek kismértékű rendeződést mutattak a forgó fej tengelyére merőleges irányban.

A PET-oldódási kísérletek azt mutatták, hogy a TFA és DCM oldószerek keverési aránya jelentősen befolyásolta a PET oldékonyságát. Teljes mértékű oldódást értünk el 15% PET esetében TFA és DCM 30/70 tömegarányú keverékével, amely jelentős csökkenést jelent a lekőzölt 70/30 és 50/50 keverékekhez viszonyítva. Ellenben a szálátmérők



1. ábra. SEM-képek a PET-hálókról 100× nagyításon. a) 10%, 6000 1/min; b) 10%, 8000 1/min c) 12,7%, 4000 1/min, d) 12,7%, 6000 1/min

kisebbség 70/30 oldószerarányánál ($0,66 \pm 0,27 \mu\text{m}$), amikor minden más feltétel nagyjából azonos [4].

A PET oldhatóságának részletesebb tanulmányozására a Hansen-féle oldódási modell alkalmazható. A 2. ábrán a PET és egyes potenciális oldószerek oldódási paraméterei láthatóak. Referenciaként a víz (nem oldószere a PET-nek) is fel van tüntetve. Látható, hogy a DCM a PET-hez közel helyezkedik el ($R_a = 2,06$ az (1) egyenlet alapján), ami az elmélet szerint arra utal, hogy jól kellene hogy oldja azt. Ennek ellenére a kísérleteink azt mutatják, hogy a tiszta DCM nem oldja a PET-et. Ezzel szemben a TFA távolabb található a PET-től ($R_a = 6,71$), és mégis feloldja. A hipotézisünk az, hogy a PET részben kristályos jellege miatt másképp lép kölcsönhatásba az oldószerekkel, és az oldódás kulcsa az oldószerek savasságában rejlik, amit a Hansen-modell nem vizsgál.

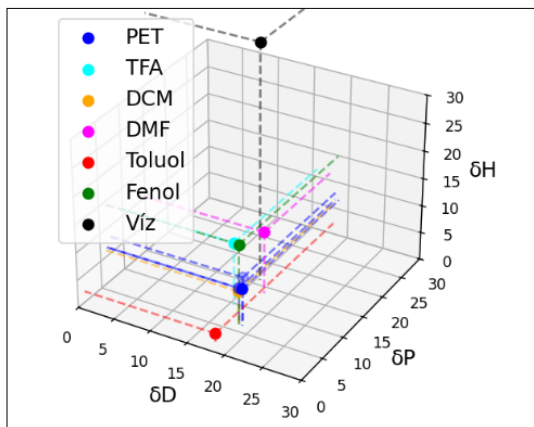
Más oldószerek-kombinációkkal végzett kísérleteink azt mutatták, hogy a PET feloldódott DCM és fenol (gyenge sav) 50/50 tömegarányú keverékében ($R_a = 2,88$). Itt megjegyzendő, hogy a fenolalapú oldatok alkalmatlanok szálképzésre, mivel a fenol szobahőmérsékleten szilárd halmazállapotú, és nem párolog el a szálképződés közben. A PET nem oldódott DMF és toluol 55/45 tömegarányú keverékében (nem savas), holott a keverék HSP-i közel álltak a PET paramétereire ($R_a = 1,57$). A jövőben további oldódási kísérleteket lehetne végezni amorf PET-tel, ahol vélhetőleg az oldószerek savassága már nem játszik szerepet.

4. Következtetések

Következtetésként elmondható, hogy centrifugális szálképzéssel sikeresen előállítottunk nem-szött, szálpaplanokat újrahasznosított PET-palackból. A 10% oldatkoncentráció, TFA/DCM = 30/70 oldószerarány, 6000 1/min szálképzési paraméterek biztosították a legkisebb szálátmérőt, $d = 1,72 \pm 0,63 \mu\text{m}$. Viszont minden vizsgált kondíció mellett gyöngyök, hibák jelentek meg a szálaikon. Az eredmények alapján a gyártási paraméterek további optimalizálása szükséges. Továbbá megvizsgáltuk a PET oldhatóságát a Hansen-modell segítségével. A modell szerint több oldószerek is oldanák a PET-et, viszont a kísérleti eredmények arra utalnak, hogy savas oldószerek használata szükséges a részlegesen kristályos anyagszerkezetű PET feloldásához.

Köszönetnyilvánítás

Gergely Attila Levente köszöni az Erdélyi Múzeum-Egyesületnek a támogatást (Iksz. 407.8.1/2023).



2. ábra. A PET és különböző oldószerek Hansen-féle oldódási paraméterei. A tengelyeken a δD – diszperziós, δP – poláris, δH – hidrogénkötéskomponenseket jelentik

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Soong Y.-H. V., Sobkowicz M. J., Xie D.: *Recent Advances in Biological Recycling of Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Wastes*. Bioengineering, 9. (2022) 98–124.
- [2] Rogalski J. J., Bastiaansen C. W. M., Peijs T.: *Rotary Jet Spinning Review – a Potential High Yield Future for Polymer Nanofibers*. Nanocomposites, 3. (2017) 97–121.
- [3] Qin Y., Qu M., Kaschta J., Schubert, D. W.: *Comparing Recycled and Virgin Poly (Ethylene Terephthalate) Melt-Spun Fibres*. Polymer Testing, 72. (2018) 364–371.
- [4] Vo P., Doan H., Kinashi K., Sakai W., Tsutsumi N., Huynh D.: *Centrifugally Spun Recycled PET: Processing and Characterization*. Polymers, 10. (2018) 680–693.
- [5] Jafari S., Hosseini Salekdeh S. S., Solouk A., Yousefzadeh M.: *Electrospun Polyethylene Terephthalate (PET) Nanofibrous Conduit for Biomedical Application*. Polymers for Advanced Techs, 31. (2020) 284–296.
- [6] Ellis D. A., Hanson M. L., Sibley P. K., Shahid T., Fineberg N. A., Solomon K. R., Muir D. C. G., Mabury S. A.: *The Fate and Persistence of Trifluoroacetic and Chloroacetic Acids in Pond Waters*. Chemosphere, 42. (2001) 309–318.
- [7] Hansen C. M.: *Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook*. 2nd edition. CRC Press, Boca Raton, 2007.
- [8] Fábíán H., Gergely A.: *Design of a High Performance Fiber-Producing Machine*. Acta Materialia Transylvanica, 5. (2022) 62–65. <https://doi.org/10.33924/amt-2022-02-03>
- [9] Reneker D. H., Yarin A. L., Fong H., Koombhongse S.: *Bending Instability of Electrically Charged Liquid Jets of Polymer Solutions in Electrospinning*. Journal of Applied Physics, 87. (2000) 4531–4547.



UNIMAX szerszámacél tulajdonságainak javítása felületbevonatolással

Improving the Properties of UNIMAX Tool Steel by Surface Coating

Kertész Olivér Gábor,¹ Tóth László²

¹ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, k.oliver0917@gmail.com

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

Abstract

The aim of this study was to determine the extent to which surface coating can improve the service life and mechanical properties of tools made from UNIMAX steel. Two specimens with identical composition and heat treatment were used, one of which was coated with a CrAlN-based BALINIT FORMERA layer. Microhardness measurements, wear tests, and microscopic analyses were carried out during the investigation. The results clearly demonstrated that the coating significantly increases the tool's lifetime and enhances its mechanical properties.

Keywords: *tool steel, tool service life, surface coating, material testing.*

Összefoglalás

A kutatás célja annak a meghatározása volt, hogy a felületbevonatolás milyen mértékben képes javítani az UNIMAX acélból készült szerszámok élettartamát és mechanikai tulajdonságait. A vizsgálatok során két, azonos összetételű és hőkezelési eljárással előállított próbatestet használtunk, amelyek közül az egyiket CrAlN-alapú BALINIT FORMERA bevonattal láttuk el. A tesztek során mikrokeménység-méréseket, kopás-vizsgálatokat és mikroszkópos vizsgálatot végeztünk. Az anyagvizsgálati eredmények egyértelműen igazolták, hogy a bevonatolás jelentősen növeli a szerszám élettartamát és javítja annak mechanikai tulajdonságait.

Kulcsszavak: *szerszámacél, szerszámélettartam, felületi bevonatolás, anyagvizsgálat.*

1. Bevezetés

Előzetes kutatásaink során egy nyomásos öntőszerszám élettartamának növelésével foglalkoztunk, amely kutatások során sikerült meghatározni egy optimális anyagminőséget és a neki megfelelő hőkezelést. A szerszám élettartama növelésének további lehetőségeire a bevonatolási technológiák kutatását határoztuk meg [1].

Az Uddeholm cég által gyártott UNIMAX szerszámacél sokféle szerszámozásnál alkalmazható, például:

- műanyagalakító szerszámok,
- megalakító szerszámok,
- nyomásos öntőszerszámok.

A rövid ciklusidő és a hosszú élettartam hozzájárul a gazdaságos gyártáshoz. Nagy keménységű, kopásálló, de emellett szívós szerszámok készülnek ebből az alapanyagból [2]. Az UNIMAX kitűnő tulajdonságú acél, ami annak köszönhető, hogy elektroszalakosan átolvasztott, aminek eredményeképpen a kéntartalom, a dúsulások és a nemfémes zárványok jelenléte is minimális [3]. Nagy tisztaságú, növelt homogenitású és jó melegszívóságú.

Az irányított kristályosodás hatására finom szemcseszerkezet és kisebb méretű karbidszemcsék érhetők el.

Ez az acél krómmal, molibdénnel és vanádiummal van ötvözve, ennek köszönhető a jó melegszívósság, a megeresztésállóság és a felületkezelhetőség (1. táblázat).

1. táblázat. Az UNIMAX szerszámacél vegyi összetétele

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,50	0,20	0,50	5,00	2,30	0,50

Hőkezelés után jó mérettartású és jól polírozható. Ezek a kedvező tulajdonságok az élettartam növeléséhez a megfelelő hőkezelési technológiával érhetőek el:

- optimális edzési hőmérséklet,
- mélyhűtés,
- céltudatosan kiválasztott megeresztési hőmérsékletek,
- többszörös megeresztés.

Bebizonyosodott, hogy a mélyhűtés hatására az UNIMAX acélból készült nyomásos öntőszerszámok élettartama jelentősen növelhető, ami a maradék ausztenit mennyisége minimalizálásának köszönhető [4].

Vizsgálataink során azt vizsgáltuk, hogy miként növelhető tovább a szerszám élettartama, illetve hogyan érhetőek el még kedvezőbb tulajdonságok megfelelő felületbevonatolási technológia alkalmazásával [5].

Felületkezeléssel javítható a kopásállóság, a felületi keménység és a korrózióállóság. A bevonatolás célja vékony, nagy keménységű felületi réteg létrehozása, amelynek kicsi a súrlódása, minimális a tapadása, nagy a kopásállósága és a korrózióállósága [6].

Az egyik leggyakrabban használt módszer a PVD-s bevonatolás. Az eljárás során vákuumban a bevonatra szánt anyagot elgőzöltetik, és lerakják a kész szerszám felületére. A bevonat nagyjából 1 mikron vastagságú réteget képez, amely szorosan kötődik a szerszámhoz. Az eljárást általában 600 °C alatt végzik, ami nincs hatással a szerszám alapkeménységére.

Az általunk használt bevonat a bevonatolási területén vezető szerepű Oerlikon Balzers BALINIT. A BALINIT-bevonatok multifunkcionálisak, egyedülálló tulajdonságúak, és növelik a gyártási folyamat hosszú távú költséghatékonyságát és termelékenységét. Nagy felületkeménységgel rendelkeznek, amely védi a szerszámot a kopásoktól és az eróziótól. Kis súrlódási együtthatóval rendelkező keramikusan anyagból áll, amely meggátolja az adhéziós és abrazív kopásokat, az ömledék

feltapadását, és javítja a formáról való leválást [7]. Kiváló hő- és kémiai stabilitást biztosít, melynek eredményeképpen nincs oxidáció, és csökken a szerszám ömledékkel való szennyeződése. Védelmet biztosít továbbá a melegrepedésekkel szemben [8].

Az előbb felsorolt tulajdonságoknak köszönhetően kisebb szerszámköltséget biztosít, növeli az élettartamot, csökkenti a termelési költségeket, az állásidőket, a kieséseket és a karbantartási költségeket [9].

Az általunk választott bevonat a BALINIT bevonatcsalád FORMERA ADVANCED. A bevonat a melegrepedések megoldására, a feltapadásátlásra és a korrózióvédelemre összpontosít. Ennek köszönhetően a szerszám nem igényel öntés utáni tisztítást, karbantartást, így csökkenti az állásidőket.

2. Anyagok, eszközök, kezelések

2.1. Anyagválasztás

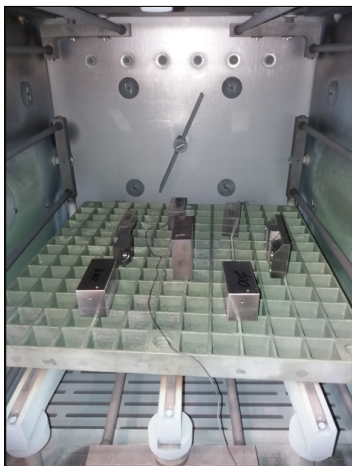
Az általunk vizsgált próbatestek egy melegalakító öntőszerszám alapanyagából készült, amely autóiipari alumínium alkatrész gyártására szolgál. A melegalakító szerszámok esetében fontos tulajdonság a kopásállóság, a termikus kifáradással szembeni ellenállás, a nagy keménység, de a jó melegszívósság is [10]. Az általunk kiválasztott Uddeholm UNIMAX szerszámacél erre a célra tökéletesen megfelelő prémium minőség. Nagy széntartalma a keménységet növeli, a króm ötvözés komplex karbidok képzéséért felel, a molibdén a karbidképzés mellett a melegszívósságot és a megeresztésállóságot is növeli, a vanádium pedig a finomszemcsésítésért és a jó kopásállóságért felel [11].

2.2. Eszközök, berendezések

2.2.1. A hőkezelő kemence

A hőkezeléseket a Lőrinciben székelő Titán 94 Kft.-ben egy Schmetz típusú elektromos vákuumkemencében végeztük, melyben a szerszámok hevítése vákuumban történik, a hűtést a nitrogén védőgáz teszi lehetővé, a mélyhűtés során pedig a cseppfolyós nitrogént porlasztják el és fecskendezik be, így elérve a –150 °C-ot.

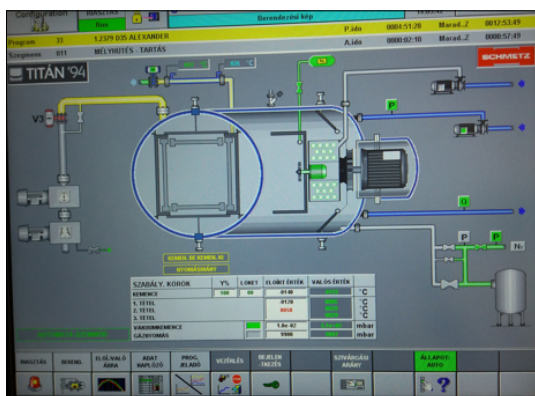
Az 1. ábrán a kemence belső terében láthatóak mindkét oldalon a grafit fűtőrudak, a középső részen a flexibilis termoelem, valamint a kemence hátsó részén elhelyezkedő ventilátor és felette a befecskendező fúvókák, amelyekken keresztül áramlik be a nitrogén. A 8 db próbatest és a behe-



1. ábra. A kemence belső tere



3. ábra. INNOVA bevonatolóberendezés



2. ábra. A kemencevezérlés képernyője



4. ábra. Servocut 302 vágógép

lyezett Ni-NiCr termoelemek a folyamat szabályozását, valamint ellenőrzését szolgálják.

A kemence felépítését a **2. ábra** szemlélteti. Látható a folyékony nitrogén tartálya, a nitrogén befűtőszellepei zölddel jelölve, valamint a kék szín a kettős falú kemence vízhűtését ábrázolja. Bal oldalon látható a kemencéhez tartozó két vákuumszivattyú.

2.2.2. A felületkezelő kemence

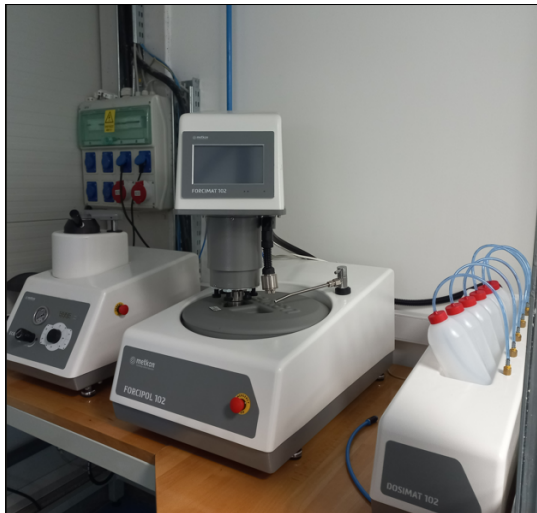
A felületkezelő kemence 700×1200 mm belső terű, INNOVA típusú berendezés (**3. ábra**), amelybe a karuszell elemre függesztett szerszámok helyezhetők be. A felületkezelő eljárás előtt a bevonatolásra szánt szerszámok vegyi, illetve mechanikai tisztításon mennek keresztül. A munkadarab kamrába helyezése után a kamrát 10–6 mbar-ra vákuumozzák [12]. A felületkezelé-

si technológia a bevonatforrás elpárologtatásával folytatódik, ami plazmafelhőt idéz elő a kemence terében, amelyhez nitrogéngázt fuvatnak be. A forráskorongokból kicsapódott atomok, illetve ionok a munkadarabhoz adhéziósan kapcsolódnak. Ez a folyamat addig tart, amíg a kívánt bevonatvastagságot eléri.

2.2.3. A mérések előkészítése

A vizsgálatokhoz először is szükség volt próbatetek kivágására, amit a **4. ábrán** látható Servocut 302 abrazív vágógéppel hajtottunk végre.

A próbatetek kivágása után az előkészítés következett, ami meleg beagyazásból, csiszolásból, polírozásból és maratásból állt. A csiszolást és a polírozást egy Forcipol 102 csiszoló-polírozó géppel (**5. ábra**) hajtottuk végre, a maratást pedig 4%-os Nitallal végeztük.



5. ábra. Csiszoló-polírozó gép



6. ábra. Mikrokeménység-mérő

2.2.4. Rétegvastagság-mérés

A mérés célja, hogy meghatározzuk a felhelyezett bevonat vastagságát. A mérés során ultrahangos impulzusokat bocsátunk a felületre, ami a bevonat és a szerszámacél határfelületéről visszaverődik, majd a visszaverődő hullám terjedési sebességéből és az eltelt idő segítségével kiszámítható a rétegvastagság a következő képlettel:

$$D = (v \times t) / 2, \quad (1)$$

ahol

D : a rétegvastagság,

v : a terjedési sebesség,

t : az idő.

2.2.5. Mikrokeménység-mérés

A mikrokeménység-mérést KB 30S KB 30 S video keménységmérő géppel végeztük, amelyet a 6. ábra szemléltet.

2.3. Hőkezelés

2.3.1. Feszültségcsökkentő izzítás

A hőkezelés első fontos lépése a feszültségcsökkentő izzítás, amely során az adott szerszámot lassan hevítettük 650 °C-ig nitrogén védőgázban, majd két órán keresztül ezen a hőmérsékleten tartottuk, végül lassan szobahőmérsékletre hűtöttük.

Erre azért van szükség, mert a szerszámgártás során belső feszültségek halmozódnak fel a szerszámban, amelyek elősegítik a repedések, esetleges törések kialakulását [13]. Az izzítással pedig redukáljuk ezt a kockázatot, ennek köszönhetően nő a szerszám élettartama is [14].

2.3.2. Edzés

A következő hőkezelés az edzés, amelyet két részre bonthatunk. Az első rész az ausztenítés, amely során az anyagot lépcsős hevítéssel edzési hőmérsékletig hevítjük, és ott hőn tartjuk a homogén ausztenit kialakulásáig. A második rész a nitrogéngázzal való, a kritikus hűlési sebesség-nél gyorsabb hűtés szobahőmérsékletig, melynek célja a martenzites szövetszerkezet létrehozása. A lépcsős hevítés célja a hőkiegyenlítés az anyag felülete és közepe között a fázisátalakulások okozta feszültségek megakadályozásáért. Az UNIMAX edzését 1050 °C-ról végeztük.

2.3.3. Mélyhűtés

A szobahőmérsékletre hűtött szerszámon érdemes további mélyhűtést alkalmazni a szerszám élettartamának további növelésének céljából [14]. Edzés után a próbatesteket tovább hűtöttük folyékony nitrogén porlasztásával -150 °C-ig. A mélyhűtés a szövetszerkezeti homogenitás javulásához vezet, egyben a keménységet és szívósságot is növeli, és jelentősen csökkenti a maradék ausztenit mennyiségét [15].

2.3.4. Megeresztések

A megfelelő szívósság-keménységi arány eléréséhez elengedhetetlen a megeresztés. Melegalkító szerszámacélok esetében nagy hőmérsékletű többszörös megeresztés indokolt a finom szemcseszerkezetű homogén szferoidit létrehozása érdekében [16], valamint a hőkezelés okozta feszültségek csökkentése céljából. A végső kemény-

séget a második megeresztési hőmérséklet beállításával értük el. Esetünkben háromszoros nagy hőmérsékletű megeresztést alkalmaztunk.

2. táblázat. Hőkezelési paraméterek [1]

Folyamat	Hőm. (°C)	Idő (perc)
Feszültségcsökkentés	650	260
Edzés	1050	200
Mélyhűtés	-150	145
Megeresztés 1.	605	240
Megeresztés 2.	615	240
Megeresztés 3.	595	240
Összes idő: 1325 perc		

2.4. Felületkezelés

A BALINIT FORMERA eltér a hagyományos PVD-bevonatolástól. Kísérletünk során ezzel az eljárással először egy plazmanitridálást végeztünk, amelyet a PVD-bevonatolás követett. Ezáltal sikerült létrehozni egy 7 µm vastagságú adhéziós réteget és egy 80 µm vastagságú diffúziós réteget. A nitridálás 480 °C-on történik, és a bevonatolás hőmérséklete sem haladja meg a szerszámmegeresztési hőmérsékletet [17]. A BALINIT FORMERA egy multilayer réteget hoz létre, aminek köszönhetően a repedések terjedése minimálisra csökkenthető. A főbb előnyei közé tartozik, hogy 1000 °C-ig hőálló, csökken az öntvényfeltapadás, és nagy értékben ellenáll a kimosódásoknak is, ezáltal növelve az élettartamot.

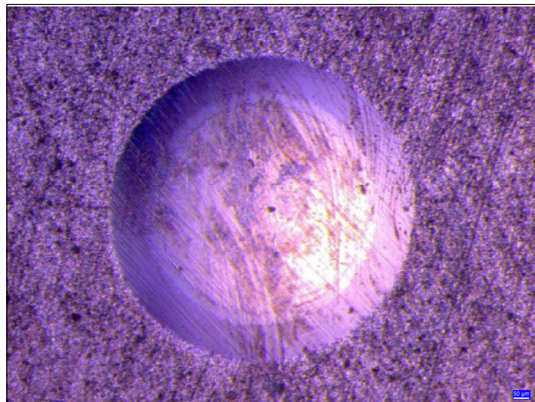
3. Mérési eredmények

3.1. Mikrokeménység-mérés

A mikrokeménység-mérés során ügyelnünk kellett arra, hogy csak minimális terheléssel végezzük el a mérést, hogy a bevonat rétegvastagságát ne haladja meg a szűrőszerszám. 0,5 kg-os terheléssel 2200 HV keménységet sikerült elérnünk. A bevonat nélküli szerszám keménysége 52 HRC, ami körülbelül 550 HV keménységnek felel meg. Ez azt jelenti, hogy a felületkezelés hatására a felületi keménység négyszeresére nőtt az előbbiekhöz képest.

3.2. Rétegvastagság-mérés

A bevonatok rétegvastagságának meghatározását FISCHERSCOPE® X-RAY XDAL® típusú készülékkel végeztük, amely röntgenfluoreszcencia (XRF) elven működik. Ez a módszer lehetővé teszi a rétegvastagság roncsolásmentes mérését a bevonat és az alapanyag elemeinek karakterizá-



7. ábra. Az egyik próbatest képe

tikus fluoreszcens sugárzásának kiértékelésével. A méréseket mindhárom bevonattal ellátott mintán elvégeztük, amely pontos adatokat szolgáltatott az egyes rétegek vastagságáról. A rétegvastagság-mérést a három próbatesten (7. ábra) ismételtük meg, aminek eredményeit átlagoltuk. A mérési eredmények átlagaként a rétegvastagság 6,94 µm.

4. Következtetés

Vizsgálataink során összehasonlítottunk két próbatestet, amelyeken ugyanazon hőkezeléseket hajtottunk végre, viszont az egyiket egy BALINIT FORMERA ADVANCED bevonattal vontuk be. A vizsgálatok során mikrokeménység-méréseket és mikroszkópos szövetszerkezet-vizsgálatokat hajtottunk végre. A vizsgálatok elvégzése után a gyakorlatban is megvalósítottuk a szerszám bevonatolását. A szerszám a megfelelő hőkezelési technológia alkalmazásával összesen 280 000 darab alkatrész elkészítésére alkalmas. A bevonatnak köszönhetően további 80 000 alkatrész elkészítésére képes az új szerszám, így az élettartama összesen 360 000 alkatrész.

3. táblázat. Alkatrészek élettartama

Élettartam bevonat nélkül	Élettartam bevonat alkalmazásával
280 000 db	360 000 db

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karának a laborhasználatért, a támogatásért és a segítségért. Továbbá köszönettel tartozunk még az Erdélyi Múzeum-Egyesületnek, amiért a XXX. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka keretein belül lehetőséget adott a téma előadására és a cikk elkészítésére.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kertész O., Tóth L.: Öntőszerszámok élettartamának növelése mélyhűtéses hőkezeléssel. *Acta Materialia Transylvanica*, 7/2. (2024) 66–70. <https://doi.org/10.33923/amt-2024-02-02>
- [2] Uddeholm AB: Brochure Uddeholm UNIMAX, 2015.
- [3] Arh B., Podgornik B., Burja J.: *Electroslag Remelting: A Process Overview*. Materials and Technology, 50/6. (2016) 971–979. <https://doi.org/10.17222/mit.2016.108>
- [4] Hawryluk M., Lachowicz M., Zwierzchowski M., Janik M., Gronostajski Z., Filipiak J.: *Influence of the grade of hot work tool steels and its microstructural features on the durability of punches used in the closed die precision forging of valve forgings made of nickel-chrome steel*. Wear, 528–529. (2023) 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204963>
- [5] Schwam D., Wallace J. F.: *Improving Tool Life for Aluminium Die Casting Dies*. Die Casting Engineer Reprint, Mar/Apr (1995) 1–4.
- [6] Bitay E., Tóth L., Kovács T. A., Nyikes Z., Gergely A. L.: *Experimental Study on the Influence of TiN/AlTiN PVD Layer on the Surface Characteristics of Hot Work Tool Steel*. Applied Sciences, 11. (19):9309. (2021) 1–12. <https://doi.org/10.3390/app11199309>
- [7] Rechverger J., Brunner P., Rubach R.: *High performance cutting tools with solids lubricants PVD coatings*. Surface and Coating Technologies, 62/1–3. (1993) 393–398. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(93\)90273-Q](https://doi.org/10.1016/0257-8972(93)90273-Q)
- [8] OERLIKON BALZERS: BALINIT bevonatok alkalmazása fémek nyomásos öntésekor. 2020.
- [9] Dúl J.: *Nyomásos öntészeti ismeretek* 1. kiadás. Nemzeti Tankönyvkiadó, Miskolc, 2009.
- [10] Szabó R.: *Öntéstechnikai és hőtechnikai paraméterek hatása az alumínium nyomásos öntvény szilárdsági tulajdonságaira*. Doktori értekezés. Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Kar, Miskolc, 2012.
- [11] Azizpour A., Hahn R., Klimashin F. F., Wojcik T., Poursaeidi E., Mayrhofer P. H.: *Deformation and Cracking Mechanism in CrN/TiN Multilayer Coatings*. Coatings, 9(6):363. (2019) 1–17. <https://doi.org/10.3390/coatings9060363>
- [12] Zeghni, A. E.; Hashmi M. S. J.: *The effect of coating and nitriding on the wear behaviour of tool steels*. Journal of Materials Processing Technology, 155–156. (2004) 1918–1922. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.281>
- [13] Artinger I.: *Szerszámacélok és hőkezelésük*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.
- [14] Monah Lal D., Renganarayanan S., Kalanidhi A.: *Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels*. Cryogenics, 41, 3. (2001) 149–155. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(01\)00065-0](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(01)00065-0)
- [15] Podgornik B., Paulin I., Zajec B., Jacobson S., Leskovšek V.: *Deep cryogenic treatment of tool steels*. Journal of Materials Processing Technology, 229. (2016) 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.045>
- [16] Tóth L.: *Reduction of retained austenite in tool steels*. Acta Materialia Transylvanica, 5/2. (2022) 52–57. <https://doi.org/10.33894/mtk-2022.16.10>
- [17] Zhanga K., Dengb J., Guoa X., Suna L., Leic S.: *Study on the adhesion and tribological behavior of PVD TiAlN coatings with a multiscale textured substrate surface*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 72. (2018) 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.01.003>



A szerszám fejlesztése alumíniumötvözetek kavaró dörzshegesztéséhez

Tool development for friction stir welding of aluminium alloys

Kozák Emese,¹ Kovács Zsolt Ferenc²

¹ Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország, kozak.emese@nje.hu

² Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország,

Abstract

In recent years, the demand for aluminium and aluminium alloys has increased due to their favourable properties. The properties of aluminium alloys are almost the same as structural steel, but their weight is approximately one third. Technological developments have made it possible to weld metals that are difficult to weld with traditional fusion welding, such as aluminium alloys, using Friction Stir Welding (FSW). This article briefly introduces the FSW procedure and its application. During this research, 5053 aluminium alloys were welded with the mentioned technology, for which customized FSW tools were used. These tools were made with 3D printing technology, which ensured the manufacturing of complex geometries. After welding, the pieces were subjected to the following material tests: visual inspection, tensile tests, hardness tests and metallographic analysis.

Keywords: *friction stir welding, FSW tool, aluminium, material testing.*

Összefoglalás

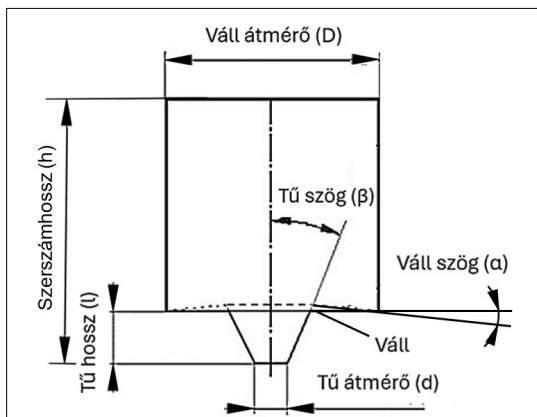
Kedvező tulajdonságai miatt az alumíniumra és annak ötvözeire az elmúlt években jelentősen megnövekedett a kereslet, mivel mechanikai tulajdonságai közel azonosak a hagyományos szerkezeti acélokéival, azonban tömegük megközelítőleg azok egyharmada. A kavaró dörzshegesztési eljárás fejlesztése leginkább a hagyományos ömlesztőhegesztéssel nehezen hegeszthető fémek, így például az alumíniumötvözetek hegesztésére irányul. Ebben a cikkben röviden bemutatjuk a kavaró dörzshegesztést, illetve annak alkalmazását. A kutatás során 5053-as alumíniumötvözetek hegesztése valósult meg az említett eljárással, amihez egyedileg tervezett szerszámokat alkalmaztunk. E szerszámok additív gyártással készültek, ami biztosította a bonyolult geometriák gyártását. A hegesztési kísérletek elvégzése után a következő anyagvizsgálatokra került sor: szemrevételezés, szakítóvizsgálat, keménységmérés, illetve metallográfiai vizsgálat.

Kulcsszavak: *kavaró dörzshegesztés, FSW-szerszám, alumínium, anyagvizsgálat.*

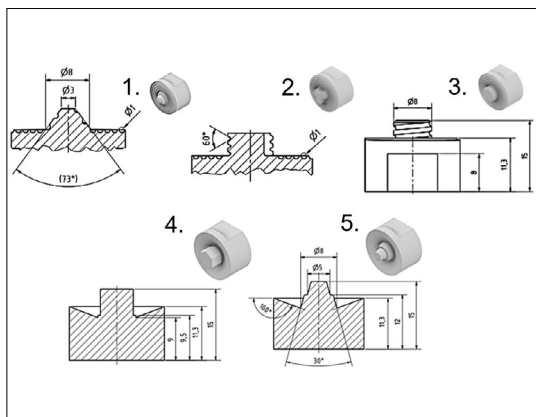
1. Bevezetés

A kavaró dörzshegesztés szilárd fázisú hegesztési eljárás, mely során az alapanyagok megolvadása nélkül hozhatunk létre kötést [1]. Alapelve az, hogy egy forgó szerszámot alkalmaznak, mely behatol a hegesztetni kívánt, rögzített munkadarabokba. A szerszám válla súrlódási hő termel,

aminek következtében a munkadarabok szilárdsága csökken, az anyag tehát kilágyul. Ebben a fázisban a szerszám, állandó forgómozgás közben, végigvonul az illesztési vonal mentén, összekavarja a képlékenyen alakváltozó anyagrészeket, majd a lehűlés során szilárd fázisú kötés alakul ki a munkadarabok között [2, 3, 4]. A szerszám



1. ábra. A kavarószerszám felépítésének egyszerűsített vázlata [5]



2. ábra. A megtervezett kavarószerszámok

fő részeit az 1. ábra mutatja. Mivel az [5] forrásból származó kép elvi hibás vázlaton mutatta be a kavarószerszám egyszerű felépítését, ezért mi azt kijavítva közöljük.

A folyamat során változó paraméternek tekintjük a hegesztendő anyagokat, azok anyagminőségét, anyagvastagságát, illetve befolyásoló tényező többek között, ha 2 vagy több egymástól eltérő anyagot kívánunk hegeszteni. A folyamat technológiai változói közé sorolható a szerszám dőlésszöge, az előtolási sebesség, a fordulatszám, a kavarószerszámot az anyagban tartó, tengelyirányú erő, illetve esetenként a folyamat során alkalmazott hűtés megléte is. A szerszám tervezésénél meghatározó szerepet tölt be a szerszám anyaga, a szerszámváll átmérője, a láb geometriája, átmérője és hosszúsága [6, 7, 8, 9].

A kutatásban korunk legdinamikusabban fejlődő gyártási eljárása, az additív gyártás is fontos szerepet kapott. A kavarószerszámok forgácsolással (anyagleválasztással) készülnek, de abban az esetben, ha az ilyen gyártás szempontjából bonyolult láb- és vállgeometriát kívánunk létrehozni, csak az additív gyártás jöhet szóba, mivel ily módon tér nyílik az összetett, a forgácsolás szempontjából túl bonyolultnak tekinthető elemek kivitelezésére is, ami többek között gazdasági szempontból is előnyt jelent.

2. A kavarószerszám tervezése

A fémtermékek additív gyártása által tér nyílik, a hagyományos megmunkáláshoz képest, gyorsabban és költséghatékonyabban legyártani a bonyolult geometriájú elemeket, így a kavaró dörzshegesztéshez szükséges szerszámot is. Az

additív gyártás a kavaró dörzshegesztésnél még csak úgy jelent meg, hogy ezzel az eljárással készített termékeket hegesztettek össze [10]. Jelen kutatás éppen ezért úttörőnek számít, hiszen e kutatás keretében vizsgáltuk Magyarországon először az additív gyártással készült szerszámok alkalmazását.

Elsősorban figyelembe vettük a hegesztendő munkadarabokat; jelen esetben ez 2 db, 4 mm vastagságú alumíniumlemez. A lemez vastagsága befolyásolja a láb hosszát, mivel az nem lehet egyenlő vagy nagyobb, mint a hegesztendő anyagvastagság. Érdemes valamivel rövidebbre tervezni a láb hosszát, hogy az ne érjen át az anyagon. Ebből eredően a szerszámláb 3,7 mm hosszúságúra lett kialakítva. A szerszámváll átmérője jelentősen befolyásolja a hegesztési varrat kialakulását. Alumíniumötvözetek esetén elmondható, hogy a szerszámváll átmérője a láb átmérőjének 2,5–3,0-szorosa. A szerszámváll átmérője befolyásolja a varrat szélességét, illetve a termelődő súrlódási hő mennyiségét.

Ebben a kutatásban minden szerszámot azonos, $D = 20$ mm vállátmérővel terveztünk meg, de a kutatás folytatásában érdemes lehet azonos paraméterek mellett különböző vállátmérők vizsgálata is. A kavarószerszám teljes hossza minden esetben $h = 15$ mm, ami elegendő a befogásra, és emellett költséghatékony is a gyártás szempontjából.

A láb átmérőjét, geometriáját, illetve a váll homlokfelületét és profilját szerszámonként eltérő módon terveztük meg, figyelembe véve, hogy a hegesztés közbeni anyagáramlást javítani tudjuk (2. ábra).

3. A hegesztési kísérletek ismertetése

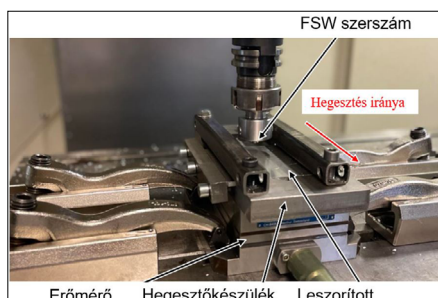
A hegesztendő lemezek anyagminősége 5053-as alumíniumötvözet, befoglaló méretei 50×90×4 mm. A kutatás során kerestük, meghatározott hegesztési beállítások mellett, a tervezett szerzsámgeometriák közül a legmegfelelebbet, a varrat minőségének roncsolásos és roncsolásmentes anyagvizsgálatával.

Összesen 15 hegesztést végeztünk konstans, 1000 min⁻¹ fordulatszámon, 3 különböző előtolási sebességgel. A szerszám dőlésszöge a mérések során 0°. Hűtést nem alkalmaztunk (1. táblázat).

1. táblázat. A hegesztés technológiai paramétereit

Mérések száma	Szerszám jele	Előtolás v_f (mm/min)
1.	1.	80
2.		125
3.		170
4.	2.	80
5.		125
6.		170
7.	3.	80
8.		125
9.		170
10.	4.	80
11.		125
12.		170
13.	5.	80
14.		125
15.		170

A hegesztés során a lemezek ugyanabban a síkban helyezkednek el, és az érintkező éleik mentén jön létre a kötés. A szerszámok spirális kialakítása miatt a főorsó a hegesztés során óramutató járásával ellentétes irányba forog (M4), hogy az anyagáramlás a szerszámkialakításnak megfelelően történjen. A kísérlet elrendezése a 3. ábrán figyelhető meg.



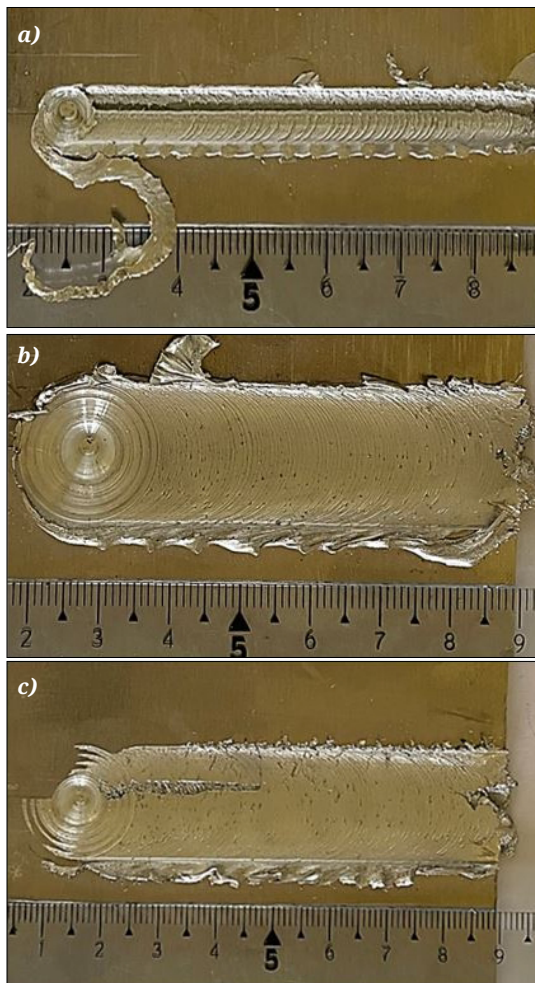
3. ábra. A kísérlet elrendezése

4. Anyagvizsgálatok

Ebben a fejezetben a hegesztett mintadarabok vizsgálatának folyamatát és eredményeit összegeztük. A varratokat szemrevételezéssel, szakítóvizsgálattal, keménységméréssel és metallográfiai úton értékeltük.

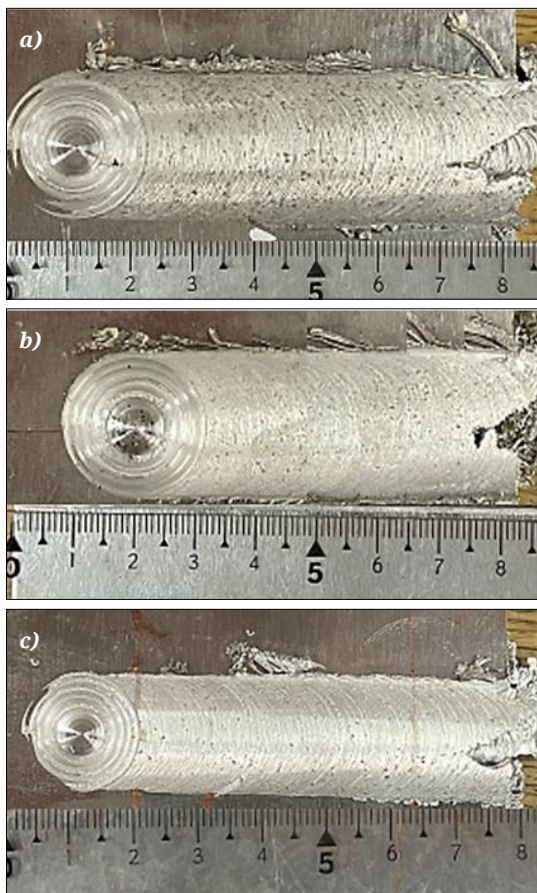
4.1. Szemrevételezés

A szemrevételezés során kiemelendők az 1-es és a 3-as szerszámmal készült hegesztési varratok. Az 1. szerszám 80 mm/min-es előtoláson mindvégig „szántotta” a varratot, nem alakult ki a megfelelő keveredésű varrat. 125 mm/min-es előtolásnál jóval ígértesebb kötést láthatunk, viszont az előtolás növelésével látható, hogy alagút-porozitási hibák léptek fel a kötésben (4. ábra).



4. ábra. Az 1. szerszámmal készített varratok felületi képei. Előtolás a) 80 mm/min; b) 125 mm/min; c) 150 mm/min

A 3. szerszám esetében mind a 3 kísérletben kialakult a varrat, a felületi érdességük viszont különböző. A 80 mm/min-es előtolás érdesebb felületet eredményezett, de az előtolás növelésével az érdesség egyre csökkent. A varrat elején kialakult hibák alagút-porozitási hibákra utalnak a varraton belül (5. ábra).



5. ábra. A 3. szerszámmal készített varratok felületi képei. Előtolás a) 80 mm/min; b) 125 mm/min; c) 150 mm/min

2. táblázat. A szakítóvizsgálat eredményei (részlet)

Próbatest	Max. terhelés (N)	Megnyúlás max. terhelésnél (mm)	Szakítószilárdság (MPa)
1/125a	6869	10,76	215
1/125b	6946	11,63	212
1/125c	6870	10,76	224
3/125a	6111	7,51	186
3/125b	7060	11,99	215
3/125c	7109	13,18	214

4.2. Szakítóvizsgálat

A hegesztett kötések keresztirányú szakítóvizsgálatához 3-3 darab, 10 mm széles próbatestet vágtunk ki a hegesztett darabokból. A próbatestek névleges szélessége 8 mm, hossza pedig 98 mm, összesen 36 db próbatest készült el, 33 db a különböző előtolási sebességeken. A szakítóvizsgálat Instron 4482 típusú szakítógépen történt. A legnagyobb terhelést az 1/125 és 3/125 jelű minták viselték el. A szakítóvizsgálat eredményeit a 2. táblázat foglalja össze.

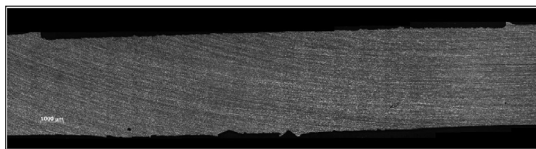
4.3. A varratok metallográfiai vizsgálata

A hideg beágyazással előkészített mintákat 3 fázisban csiszoltuk, először 320, 600 és 1200-as finomságú csiszolópapírral, ezt követően vizsgáltuk meg mikroszkóppal, hogy feltárjuk a lehetséges hibákat.

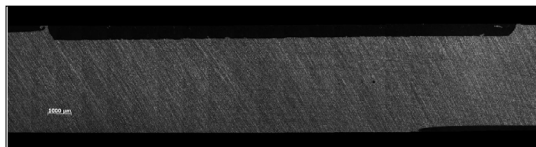
Mindegyik varratban találtunk különböző méretű hibákat. Az összes varratot vizsgálva az 1/125 és a 3/125 jelű varratokban a legkisebb a hibák kialakulásának mértéke (6. és 7. ábrák).

4.4. Keménységmérés

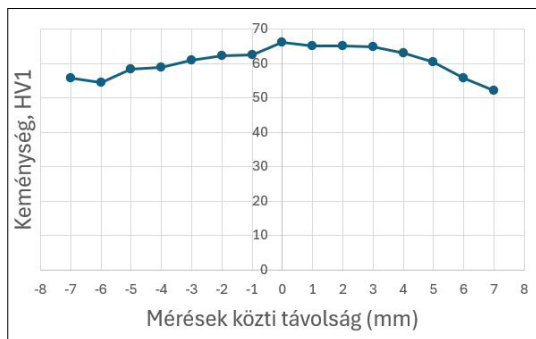
Vickers-keménységmérést végeztünk a beágyazott mintadarabokon Struers Duramin100 típusú gépen. A vizsgálatot az 1/125 és 3/125 jelű mintán végeztük, melyek a korábbi vizsgálatok során a legeredményesebbnek bizonyultak. A terhelés 9,81 N volt. minthogy a hegesztendő darabok azonos anyagúak voltak, ezért várható volt, hogy a keménység is közel azonos lesz a mért pontokon, illetve nagyobb a varratban. A mérést a koronaoldalon végeztük balról (hátra oldaltól) jobbra (előre oldal felé) (8. és 9. ábra) [2].



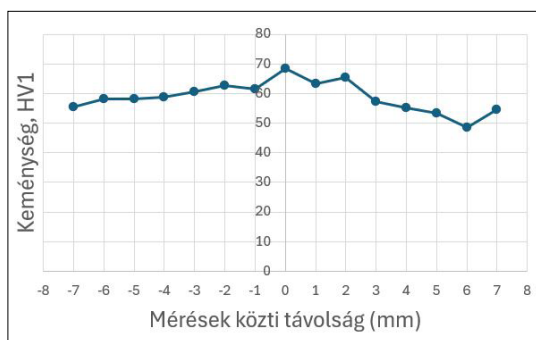
6. ábra. Az 1-es szerszámmal hegesztett mintadarab keresztmetszeti képe 125 mm/min előtolás esetében



7. ábra. A 3-as szerszámmal hegesztett mintadarab keresztmetszeti képe 125 mm/min előtolás esetében



8. ábra. Keménységmérés az 1-es szerszámmal hegesztett mintadarab esetében, előtolás 125 mm/min



9. ábra. Keménységmérés a 3-as szerszámmal hegesztett mintadarab esetében, előtolás 125 mm/min

5. Az eredmények értékelése

A vizsgálatok eredményei közül kiemelkedőnek értékeljük az 1. és a 3. szerszámmal végzett hegesztést, mindkettő 125 mm/min-es előtolással történt. Ezeket a szerszámokat a továbbiakban is érdemes vizsgálni, eltérő hegesztési paraméterek mellett, mint például a szerszámdőlés beállítása (1–3°).

A szerszámokon elhelyezett spirális csatornák javítják az anyagáramlást a kavarás közben.

A konkáv váll kialakítását is érdemes tovább vizsgálni, empirikus úton megtalálni az optimális szerszámválszöget, ami kedvezően hat a hegesztési varrat kialakulására.

A 2. szerszám esetében a szerszám lábának függőleges irányú bemarásait kerülni kell ezek mellett a beállítások mellett, mivel ez a megoldás egyik előtolási értéken sem felelt meg. Ugyanakkor érdemes tovább folytatni a kísérleteket, de a hornyokat úgy kell kialakítani, hogy azok mentén az anyag áramlani tudjon a hegesztési folyamat közben.

Köszönetnyilvánítás

A 2024-2.1.1-EKÖP-2024-00008. számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2024-2.1.1-EKÖP pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Michael H., Stefan B., Sven S.: *Influence of surface roughness of tools on the friction stir welding process*. Journal of Welding and Joining, 32/6. (2014) 22–28. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.6.22>
- [2] Kovács Zs. F., Hareancz F.: *A kavaró dörzshegesztés alkalmazási lehetőségei alumínium kompozitok esetén*. Gradus, 8/1. (2021) 294–298. <https://doi.org/10.47833/2021.1.ENG.011>
- [3] Singh Bharat Raj: *A Hand Book on Friction Stir Welding*. LAP Lambert Academic Publishing, UK, 2012. 3–7, 69, 72–74, 90–104. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5088.6244>
- [4] Kilic S., Ozturk F., Demirdogen M. F.: *A comprehensive literature review on friction stir welding: Process parameters, joint integrity, and mechanical properties*. Journal of Engineering Research, 13/1. (2025) 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.09.005>
- [5] Bilici M. K.: *Effect of tool geometry on friction stir spot welding of polypropylene sheets*. Express Polymer Letters, 6/10. (2012) 805–807. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2012.86>
- [6] Kovács Zs. F.: *Acéllemez kavaró dörzshegesztése*. Hegesztés Technika, XXXIV/1. (2023) 51–53.
- [7] Mugada K. K., Kumar A.: *Role of Tool Shoulder End Features on Friction Stir Weld Characteristics of 6082 Aluminum Alloy*. Journal of The Institution of Engineers (India), Series C, 100 (2019) 343–350. <https://doi.org/10.1007/s40032-018-0451-9>
- [8] Tarasov S., Amirov A., Chumaevskiy A., Savchenko N., Rubtsov V. E., Ivanov A., Moskvichev E., Kolubaev E.: *Friction Stir Welding of Ti-6Al-4V Using a Liquid-Cooled Nickel Superalloy*. Tool Technologies, MDPI, 10/118. (2022) 1–2, 13–14. <https://doi.org/10.3390/technologies10060118>
- [9] Abolusoro O. P., Akinlabi E. T., Kailas S. V.: *Impact of tool profile on mechanical behavior and material flow in friction stir welding of dissimilar aluminum alloys*. Materialwissenschaft Werkstofftechnik, 51. (2020) 729–730. <https://doi.org/10.1002/mawe.202000002>
- [10] Javadi M. S., Ehteshamfar M. V., Adibi H.: *A comprehensive analysis and prediction of the effect of groove shape and volume fraction of multi-walled carbon nanotubes on the polymer 3D-printed parts in the friction stir welding process*. Polymer Testing, 117. (2023), 107844. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107844>



A lézeres felületedzésnek 1.2379 szerszámacél esetén különböző felületi kialakításokra gyakorolt hatása

Effect of Laser Surface Hardening on Different Surface Designs in the Case of 1.2379 Tool Steel

Mészáros Béla,¹ Fábíán Enikő Réka²

¹ Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest, Magyarország, meszaros.bela@bgk.uni-obuda.hu

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

Abstract

Laser surface treatments are increasingly used for the formation of hardened layers. In this experimental series, we examined surfaces machined to three different depths (0.25 mm, 0.5 mm, and 0.75 mm) to determine how these machining depths affect the thickness of the hardened layer. The base material was 1.2379 tool steel in all cases. The focal distance remained constant, while the laser power and scanning speed were varied according to the predefined experimental design. Our results indicate that higher specific power led to a deeper hardened layer. The 45° machining angle—and consequently, the 45° laser beam incidence angle—enhanced absorption and increased the hardening depth. The deepest grooves resulted in the thickest hardened layer. However, during our experiments, certain parameter settings raised the base material's temperature above the liquidus point, causing localized melting.

Keywords: tool steel, laser beam hardening, diode laser, surface texture.

Összefoglalás

A lézeres felületkezelési eljárásokat egyre szélesebb körben alkalmazzák edzett rétegek kialakítására. Jelen kísérletsorozatban három, különböző mélységben megmunkált felületet vizsgáltunk (0,25 mm, 0,5 mm és 0,75 mm) annak érdekében, hogy meghatározzuk, ezek a kiemelkedések és bemélyedések milyen hatással vannak az edzett réteg vastagságára. Az alapanyag minden esetben 1.2379-es szerszámacél volt. A fókusz távolságot állandó értéken tartottuk, míg a lézernyaláb teljesítményét és a pásztázási sebességet az előzetesen kidolgozott kísérletterv szerint változtattuk. A nagyobb fajlagos hőbevitel mélyebb edzett réteg kialakulását eredményezte. A 45°-os megmunkálás – és ezzel együtt a nyaláb 45°-os beesési szöge – növelte a hevített réteg vastagságát, valamint fokozta az edződés mélységét. A legmélyebb hornyok esetében alakult ki a legvastagabb edzett réteg. Néhány paraméterpárosítás a felülete közelében a hőmérsékletet a likvidusz hőmérséklet fölé emelte, így az anyag lokálisan megolvadt.

Kulcsszavak: szerszámacél, lézeres felületkezelés, diódlézer, felületi szerkezet.

1. Bevezetés

A diódlézeres hőkezelés egyre nagyobb szerepet kap az iparban a felületi keményítés terén, különösen az autóiparban, repülőgépiparban és szerszámgépiparban. Az eljárás alapelve az, hogy a lézernyaláb lokalizált hőbevitelt biztosít, amely

révén a munkadarab felületén végbemenő martenzites átalakulás növeli a kopásállóságot és az élettartamot.

Azonban a különböző topográfiájú anyagfelületek energiaelnyelése és -visszaverése jelentős hatással van az edzett réteg minőségére és mélységére. A lézersugárzás egy része elnyelődik a mun-

kadarab felületén, míg a fennmaradó hányad visszaverődik (reflexió), ami energiavesztéseget eredményez. A reflexió mértéke függ az alkalmazott sugárzás hullámhosszától és a munkadarab felületi érdességétől [1]. A nagy reflexió miatt a lézersugárzás egy része nem hasznosul, ami egyenlőtlen hőbevitelhez és inhomogén edzett réteghez vezethet. A probléma megoldására különböző ipari felületkezelési technikákat alkalmaznak:

- Felületi oxidáció: egy vékony oxidréteg (pl. hőkezeléssel vagy vegyi eljárással) csökkenti a visszaverődést, különösen polírozott felületeknél.
- Szórás vagy maratás: a durvább felületképzés növeli az elnyelt energiát és csökkenti a reflexiót.
- Grafit- vagy festékréteg alkalmazása: ezek az anyagok javítják az elnyelőképességet, és az iparban gyakran használják lézeres hegesztés és felületkezelés előtt [2].

Az egyes lézertípusok különböző hullámhosszon üzemelnek, és ezek a különböző működési tartományok megváltoztatják az anyagba bevitt hő mennyiségét, ezzel befolyásolva az edzett réteg vastagságát. Az 1. táblázat azt mutatja, hogy kétféle lézer esetén a különböző felületeknek mekkora az energiaelnyelő képessége, más néven abszorpciója százalékos arányban.

A CO₂-lézer infravörös tartományban működik (10,6 µm hullámhosszon), míg az YAG-lézer jellemzően a közeli infravörös tartományban üzemel (1,06 µm hullámhosszon). Ez a hullámhossz-különbség meghatározó szerepet játszik abban, hogy a különböző anyagok és felületi struktúrák milyen mértékben nyelik el a lézerfényt. A sima, polírozott felületek esetén az abszorpció általában kisebb, míg az érdesített vagy oxidált réteggel ellátott felületek hajlamosabbak nagyobb energiaelnyelésre. Az abszorpciós paramétereket tekintve a CO₂-lézer és az YAG-lézer eltérően viselkedik a különböző felületkezelések esetén. A polírozott felületek esetében mindkét lézertípusnál kicsi az abszorpció, de a YAG-lézer sugárzása valamivel jobban elnyelődik a fémekben, míg a CO₂-lézeré hajlamosabb visszaverődni. A csiszolt és esztergált felületek már nagyobb abszorpciót mutatnak, különösen a YAG-lézer esetén, mivel a finom érdesség segíti az energiaelnyelést. A szórt és oxidált felületek lényegesen jobb elnyelési képességgel bírnak mindkét lézernél, de itt is a YAG-lézer mutat nagyobb hatékonyságot. A grafitozott felületek kimagaslóan jó abszorpciót mutatnak mind a két lézertípus esetén [3].

1. táblázat. Az abszorpciós tényező változása különböző felületminőségek és lézerek alkalmazásakor [3]

Felület	Abszorpció, %
	Diódlézer, 700–1070 nm
Polírozott	30–40
Csiszolt	45–55
Esztergált	55–65
Homokszórt	75–85
Oxidált	85–95
Grafitozott	90–98

Az abszorpciós értékek alapján a YAG-lézer alkalmasabb a felületi edzésre, mivel a sugárzása jobban elnyelődik a különböző fém felületeken, különösen az oxidált, szórt és grafitozott rétegek esetében. A CO₂-lézer főként nemfémek anyagokhoz és nagyobb felületek hőkezeléséhez ideálisabb. A megfelelő lézertípus kiválasztása tehát kritikus szerepet játszik az optimális hőbevitel és az egyenletes edzési mélység elérésében.

A diódlézerek széles körben alkalmazott lézertípusok, amelyeket ipari megmunkálásokhoz, orvosi eszközökben és kommunikációs rendszerekben is használnak. Ezek a lézerek 700–1070 nm közötti hullámhosszon működnek, ami lehetővé teszi, hogy a sugárzás hatékonyan elnyelődjön különböző fémfelületeken, különösen, ha a felület oxidált vagy érdesített. E kísérletsorozatban diódlézert alkalmaztunk, aminek legfőbb előnyeként elmondható, hogy jól mobilizálható, egyszerű kezelésű és parametrizálható lézerről van szó. Ha megvizsgáljuk a diódlézerek különböző felületekre vonatkozó abszorpciós jellemzőit, akkor az 1. táblázatban látható, százalékban kifejezett eredményeket kapjuk.

Az 1.2379-es acél (AISI D2) hidegalakító szerszám-acél, amelynek keményítése kulcsfontosságú az élettartam és kopásállóság növelése érdekében. Diódlézernél végzett felületedzés során a keményített réteg vastagsága jellemzően 0,3–1,5 mm között változik a lézer teljesítményétől és a megmunkálási sebességtől függően [4]. Az edzett réteg vastagsága további tényezőktől is függ, úgy mint a nyaláb beesési szöge. Ez meghatározza az energiaelnyelést és a hőeloszlást. A 90°-os beesési szög biztosítja az optimális elnyelődést, míg a kisebb szögű (pl. 45°-os) sugárzás esetén a fény egy része „elpattan” a felületről, csökkentve az edzési hatékonyságot [5].

Egy kísérletben AISI 410 rozsdamentes acél diódalézeres felületi keményítést vizsgálták különböző beesési szögeknél, ahol a **2. táblázat**ban látható átédződött rétegvastagságok látszódnak a nyaláb beesési szögének megfelelően.

2. Anyagok, eszközök és technológiák

Az alapanyag Ø80 mm melegen hengerelt, előnemesített állapotú, HB 230–250 keménységű, 1.2379 (X153CrMoV12 vagy D2) szerszámacél rúd (1,53% C, 0,35% Si, 0,4% Mn, 12% Cr és 0,85% V) volt. A kísérletek érdekében 30 mm vastagságú szeleteket vágtunk le, és az így nyert síkfelületeken terveztük a kísérleteket. Annak megállapítása érdekében, hogy miként befolyásolják a megmunkálási felületek a lézeres edzést, különböző felületi mélységű, V alakú hornyokat alakítottunk ki.

A mintadarabok felületének előkészítése egyetemes marógépen történt, ahol 0,25; 0,5 és 0,75 mm mélységű hornyokat martunk be (**1. ábra**). Az alkalmazott szerszám keménységű szármaró (MC326-12.0W4L050C-WK40TF) volt, amelynek főlelhelyezése 90°-os szögű. A főorsó döntésével és a szerszám kialakításának köszönhetően jöttek létre a „V” alakú hornyok, miközben megfelelő hűtő-kenő folyadékot alkalmaztunk. A marási folyamatok során a megfelelő hűtés és kenés biztosítása kulcsfontosságú volt a marás minőségének fenntartása érdekében.

A lézeres hőkezelést a Budai Benefit Kft. lézertechnológiai üzemében végeztük. A folyamat során 4 kW-os diódalézert alkalmaztunk, három különböző technológiai adatpárosítással.

Az eljárás célja az volt, hogy vizsgáljuk a különböző mélységű hornyok hatását a lézeres hőkezelésre és az anyag tulajdonságaira. A kísérletek eredményei segítenek meghatározni az optimális technológiai paramétereket az ipari alkalmazásokhoz. Az előzetes irodalomkutatások alapján [2, 6] 150, 200 és 240 Ws/mm fajlagos hőbevitellel pásztáztuk a mintafelületeket. A felületkezelés során a 340 mm fókusztávolságot használtuk a síkfelületekhez viszonyítva. Az egyes mintajelölésekhez tartozó technológiai adatokat a **3. táblázat**ban láthatjuk.

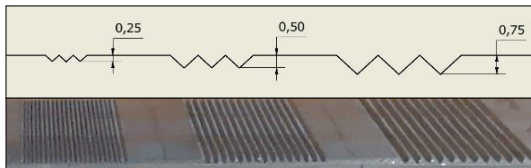
A felületkezelte mintadarabot hőkezelt felületektől, 10 mm távolságban, hűtő-kenő folyadék alkalmazásával, szalagfűrésszel lefűrészeltük (**2. ábra**). Az így kapott lemezekből metallográfiai vizsgálatok érdekében, a hőkezelt pászmák közepvonalaiban 40 mm szélességű csíkokat daraboltunk, úgy, hogy a minták tartalmazzanak a hornyolt részből és a sík felületből is értékelhető részegységet.

2. táblázat. Az edzett réteg vastagsága a lézernyaláb beesési szögének függvényében [2]

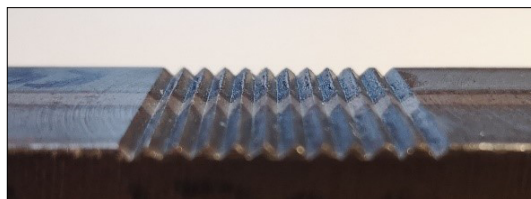
Beesési szög	Edzett réteg vastagsága (mm)
90°	1,2 mm
60°	0,8 mm
45°	0,5 mm

3. táblázat. Az egyes mintákhoz tartozó technológiai adatok

Beállított paraméterek	Minta sorszáma és a hozzá tartozó bemunkálási mélység		
	0,25 mm	0,5 mm	0,75 mm
1,2 kW			
→ 8 mm/s	22	23	24
1,6 kW			
→ 8 mm/s	25	26	27
1,2 kW			
→ 5 mm/s	28	29	30



1. ábra. Az elkészített felületek vázlata és képe



2. ábra. 0,75 mm mély hornyok hőkezelés után

A mintákat hidegbeágyazás után több fokozatban csiszoltuk, políroztuk, majd Nital-2 marószerezrel marattuk, hogy láthatóvá tegyük a beedződött rétegvastagságokat. A fénymikroszkópos vizsgálatokat Olympus DSX1000 digitális fénymikroszkóp segítségével elemeztük.

A minták keménységét Zwick 3212 keménységmérő készüléken mértük mind a sík felületre mérőlegesen, mind a hornyok csúcsából kiindulva. Ahhoz, hogy keménységváltozást tudjunk mérni, miközben betartjuk a lenyomatok közti előírt távolságokat [7], a terhelést 1,962N-ra választottuk.

3. Vizsgálati eredmények

Következtetéseinket az elkészített csiszolatok mikroszkópos elemzéséből és a mintákon mért keménységfutasokból alkottuk meg.

Az előzetes irodalomkutatások [6], a metallográfiai vizsgálatok azt mutatják, hogy az edzett réteg vastagsága kisebb, mint a bemunkálásokkal elkészített felületnél. Megfigyelhető, hogy már a legkisebb fajlagos energia mellett is a kialakított, V alakú bemunkálásoknak az éles csúcsai és völgyei elvesztették alakjukat, és lekerekített formák kezdtek kirajzolódni (3. ábra). Az eredetileg kialakított formát piros vonal mutatja a 3. ábrán. Jelen kísérletsorozatunkban ez az a beállítás, ahol a legkevesebb hő közöltük az alanyanyaggal.

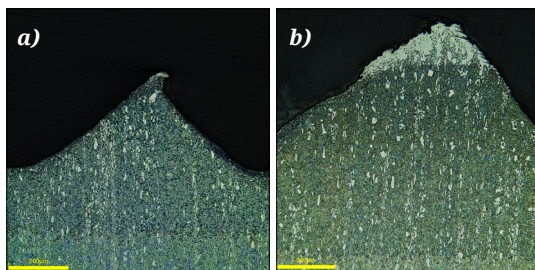
A keménységváltozás feltárása érdekében a keménységméréseket a síkfelületre merőlegesen, valamint a kialakított fogak élétől kiindulva végeztük. Az így kapott adatok alapján szerkesztettük meg a keménységváltozási diagramokat.

A legnagyobb keménységet jellemzően az edzett felületi rétegben mérhetjük, amely fokozatosan csökken a mag felé haladva. A legkisebb hőbevitellel végzett keménységmérési eredmények a 4. ábrán láthatók.

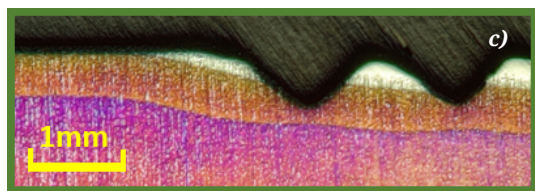
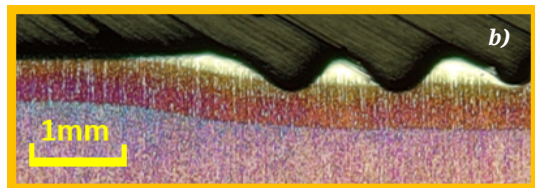
A keménységmérésekből az látszik, hogy a megmunkált csúcsonál az edződött réteg keménysége nagyobb, mint a síkfelület közelében elért keménység, ami arra utal, hogy nagyobb hőelnyelődés történik a megmunkált éleknél, ami a primer ausztenit szemcseméretének növekedéséhez járulhatott hozzá. A keménységmérési ered-

ményekből (4. ábra) az is látszik, hogy a mélyebb hornyolósú mintadaraboknál, megmunkálási csúcsonál a felület közelében kisebb a keménység, mint 200 μm -re a felülettől, ami a szövetszerkezetben is megmutatkozik (5. ábra).

A kísérletsorozatunk következő beállításainál megnöveltük a lézer teljesítményét 1200 W-ról 1600 W-ra. A pásztázás sebességét konstans értéken tartottuk (8 mm/s). Ennek a beállításnak köszönhetően a fajlagos hőbevitel az előző beállításához képest növekedett (200 Ws/mm). A metallográfiai vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy a megmunkálással kialakított csúcsok legömbölyödtek, megolvadtak. Kis nagyítás mellett a nitállal való maratást követően a megolvadt és újradermelt anyagrészek világosak (6. ábra).



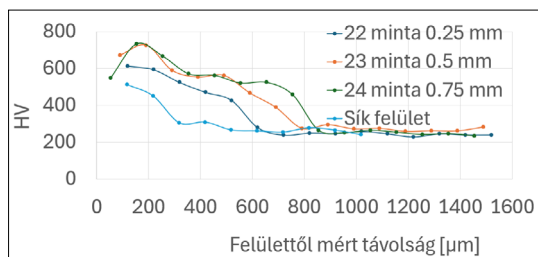
5. ábra. Megmunkálási csúcs környezete felületkezelés után: a) 22. minta b) 24. minta



6. ábra. 200 Ws/mm-es fajlagos nyalábenergiával végzett felületi hőkezelés megjelenése met-szeten: a) 25. jelű minta, b) 26. jelű minta, c) 27. jelű minta



3. ábra. 150 Ws/mm-es fajlagos hőbevitellel végzett felületi hőkezelés hatása a 22. mintánál



4. ábra. Keménységváltozás 150 Ws/mm-es fajlagos hőbevitellel végzett hőkezelés után

Nagyobb felbontás mellett a dendrites kristályosodás is jól megkülönböztethető (7. ábra). A megolvadt anyagrészek alatt két átmeneti tartományt is megkülönböztethetünk. A megolvadt zóna alatt található egy olyan tartomány, ahol a hőmérséklet a szolidus és az Ac_m közé került, ahol az eredeti karbidsoros szövetszerkezetben megindult a homogenizálódás, de a felületkezelési időtartam rövideje miatt nem lett homogén a szövetszerkezet. A 6. ábrán látható felvétel középső tartománya A1 és Ac_m közé hevült, majd a darab gyors hőelvonása miatt a karbidsorok közti rész martenzitesen alakult át. Ezt a megállapítást a 8. ábrán látható keménységmérési eredmények támasztják alá. A felülettől mérve 400–600 μm közötti mélységben az anyag keménysége elérte a 700–750 HV értéket a 0,5 mm és a 0,75 mm mélységű hornyolt területeken.

Az utolsó méréssorozatunknál az eredeti 1200 W teljesítményhez 5 mm/s pásztázási sebességet választottunk, ezért tovább növeltük a fajlagosan közölt hő mennyiségét, így a síkfelületet 240 Ws/mm sugárzás érte. Ebben az esetben is olyan hőmennyiséget közöltünk az alapanyag felületébe, ami a megmunkálási csúcsoknál azt megolvasztotta (9. ábra), ezáltal a kialakuló anyag keménysége ezeken a helyeken jelentősen kisebb lett, mint ott, ahol csak edződött a kéreg, ahogy azt a 10. ábra szemlélteti.

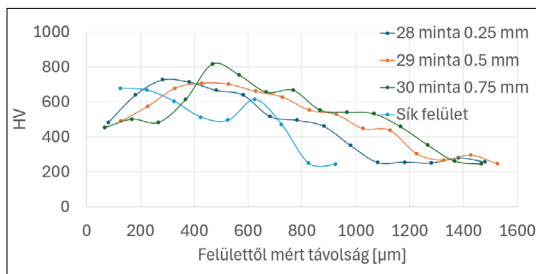
A keménységváltozási diagramokon látszik, hogy a felületközeli szakaszon a keménység 500 HV értékről indul, majd ahogy távolodunk a felszíntől, nagyobb keménységű edzett réteg (800 HV) keletkezik 450 μm mélységben (10. ábra).

A 9. ábrán jól látszik, hogy a közölt hőmennyiség hatására az éles sarkok megolvadtak, és teljesen eltorzult, lekerekedett formák jöttek létre a profilon.

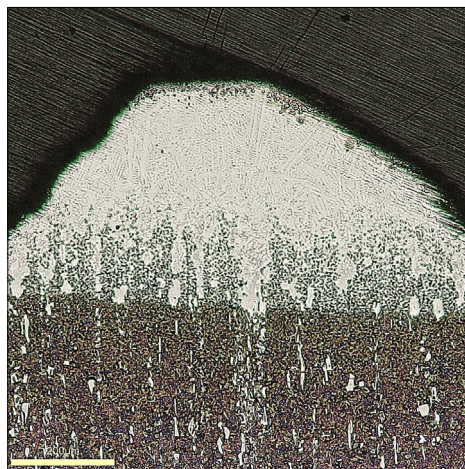
A nem megfelelően kiválasztott paraméterek az alapanyag hőkezelése során akár megolvadást okozhat, ami amellet, hogy a felületi keménység, kopásállóság nem lesz megfelelő, a megmunkálási élek is deformálódhatnak, ami egy hidegmegmunkáló szerszám esetén nemmegfelelőséghez járul.

4. Következtetések

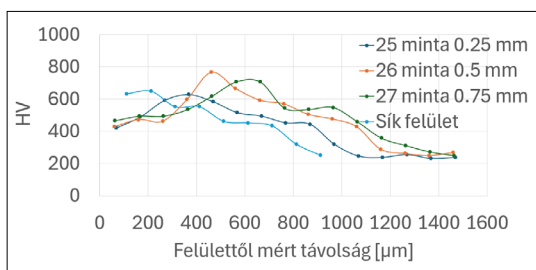
Lézeres edzési kísérleteink során három különböző beállítás mellett vizsgáltuk az 1.2379 hidegalakító szerszámacél viselkedését különböző felületi kialakítások mellett. Minden beállítás esetén a legmélyebb bemunkálás (0,75 mm) hozta a legmé-



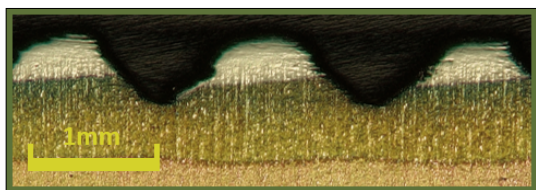
7. ábra. Megmunkálási csúcs környezete felületkezelés után: 26. számú minta



8. ábra. Keménységlefutások 200 Ws/mm-es fajlagos energiával végzett hőkezelés után



9. ábra. 240 Ws/mm fajlagos hőbevitellel végzett felületi hőkezelés megjelenése metszeten: 30. jelű minta



10. ábra. Keménységlefutások 240 Ws/mm-es fajlagos hőbevitellel végzett hőkezelés után

lyebb edződött réteget. A legvékonyabb edződött réteg minden esetben a síkfelületnél keletkezett. A 45°-os nyaláb beesési szöge nagyobb hőbevitelt eredményezett, mint a felületre merőlegesen eső lézertény.

Amennyiben a termék felületi kialakításai miatt a felület közelében akár csak lokálisan is megolvadt tartományok jöttek létre, azok dendritesen kristályosodtak, a keménység kisebb, mint ott, ahol csak hőkezelési martenzites szövetszerkezet jött létre.

Az 1.2379 anyagminőség diódlézeres hőkezeléséhez 1200 W-os teljesítmény és 8 mm/s-os pásztázási sebesség mellett 0,5 mm-es mélységű 45°-os megmunkálások még homogén edzett kéréget eredményeznek, ennél nagyobb energiabevitel mellett akár felületi olvadás is bekövetkezhet, különösen a karbidsorok környezetében.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Henrikki P., Veli K.: *Diode laser beam absorption in laser transformation hardening of low alloy steels*. Journal of Laser Applications, 16/3. (2004) 147–153.
<https://doi.org/10.2351/1.1710879>

[2] Moradi M., Arabi H., Jamshidi N., Benyounis K.: *A comparative study of laser surface hardening of AISI 410 and 420 martensitic stainless steels by using diode laser*. Optics & Laser Technology, 111. (2019) 347–357.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.10.013>

[3] Buza G: *Lézersugaras technológiák I*. Kézirat. Edutus Főiskola, Tatabánya, 2012.

[4] Temmler A., Cortina M., Ross I., Küpper M. E., Rittinghaus S. K.: *Evolution of Surface Topography and Microstructure in Laser Polishing of Cold Work Steel 1.2379 (AISI D2) Using Quadratic, Top-Hat Shaped Intensity Distributions*. Materials, 15/3. (2022) 769.
<https://doi.org/10.3390/ma15030769>

[5] Dewi H. S., Volp J., Kaplan A. F. H.: *Leaser beam absorbtion depending on the angle of incidence on groud surfaces*. Laser in manufacturing conference LIM 2019. 1–6. pdf.

[6] Mészáros B., Fábíán E. R.: *The Effect of Surface Machining Design on the Efficiency of Laser Surface Treatment*. Acta Materialia Transylvanica, 7/2. (2024) 88–93.
<https://doi.org/10.33924/amt-2024-02-06>

[7] MSZ EN ISO 6507-1:2024 Fémek. Vickers-keménységmérés. Mérési eljárás, 2024.



A kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetésének hatása kézi lézeres hegesztés esetén

The Effects of the Laser Pulse Duty and the Wobble in Case of Manual Laser Welding

Simon Virág,¹ Varbai Balázs,² Puskás Zsolt³

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, simon.virag240@gmail.com

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, varbai.balazs@gpk.bme.hu

³ Exasol Kft. Rétság, Magyarország, puskas@exasol.hu

Abstract

In our research we investigated the effects of the laser pulse duty and the wobble on the weld geometry in pulsed mode manual laser welding. Our experiments showed that, for the parameters studied, complete fusion can be achieved without laser wobbling at 500 W power for a material grade of 1.4301 and a wall thickness of 1.4 mm. Increasing the laser wobble amplitude led to an increase in weld width and a decrease in weld depth and weld area. Increasing the pulse duty also increased the weld width, weld depth and weld area. Without laser wobbling, a weld with an area of 1.1 mm² was produced when the pulse duty was set to 70%, while a weld with an area of 1.6 mm² was produced when the pulse duty was set to 100%, so that the area of the weld welded with a pulse duty of 70% was approximately 70% of the area of the weld welded with a pulse duty of 100%.

Keywords: manual laser welding, pulsed laser, pulse duty, laser wobble, weld geometry.

Összefoglalás

Kutatómunkánk során a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetésének varratgeometriára gyakorolt hatását vizsgáltuk impulzusos üzemmódú kézi lézeres hegesztés esetén. Kísérleteink alapján kiderült, hogy a vizsgált paraméterek mellett a lézernyaláb lengetése nélküli esetben érhető el teljes átolvadás 500 W teljesítménnyel 1.4301 anyagminőség és 1,4 mm falvastagság esetén. A lézernyaláb-lengetési amplitúdó növelése a varratszélesség növekedéséhez, valamint a teljes varratvastagság és a varratterület csökkenéséhez vezetett. A kitöltési tényező növelésével nőtt a varratszélesség, a teljes varratvastagság és a varratterület is. A lézernyaláb lengetése nélkül, 70%-os kitöltési tényező beállítása mellett 1,1 mm² területű varrat, míg a 100%-os kitöltési tényező beállítása mellett 1,6 mm² területű varrat keletkezett, tehát a 70%-os kitöltési tényezővel hegesztett varrat területe jó közelítéssel 70%-a lett a 100%-os kitöltési tényező beállítása mellett hegesztett varrat területének.

Kulcsszavak: kézi lézeres hegesztés, impulzusos lézer, kitöltési tényező, lézernyaláb-lengetés, varratgeometria.

1. Bevezetés

A lézeres hegesztés gépesített változatát széleskörűen alkalmazzák az iparban, hiszen számos előnnyel bír [1]. A kis területre fókuszált, erősen koncentrált lézernyaláb igen csekély hőhatás-vezetést hoz létre, és a hagyományos ömlesztőhe-

gesztési eljárásokhoz képest kis hőbevitelt eredményez, minimálisra csökkentve a munkadarab belső feszültségek általi deformációját, vetemedését [2, 3]. A lézeres hegesztés további előnye, hogy nagy feldolgozási sebességet és ezáltal nagy termelékenységet kínál [4]. Egyre elterjedtebb

bé válnak az elmúlt évek során piacra bocsátott kézi lézeres hegesztőberendezések is, Magyarországon is egyre több cég forgalmaz és használ ilyen berendezéseket. A könnyű hegesztőpisztoly és munkakábel, valamint kis méretű, mobilis lézeroszcillátor által biztosított felhasználóbarát kezelhetőség egyre népszerűbbé teszi ezeket a hegesztőgépeket [5]. Az azonban elmondható, hogy újszerű volta miatt viszonylag kevés tapasztalat és kutatási eredmény áll rendelkezésre ezzel az eljárásváltozattal kapcsolatban a régebbi, hagyományos ömlesztőhegesztési eljárásokhoz képest.

Jelen kutatásunkban a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetésének varratgeometriára gyakorolt hatását vizsgáltuk ausztenites rozsdamentes acél kézi lézeres hegesztése esetén.

2. Hegesztési kísérletek és értékelésük

Kísérletsorozatunk 12 db hernyóvarratból állt. A kísérleti varratokat 1,4 mm falvastagságú, 34 mm külső átmérőjű, 1.4301 anyagminőségű ausztenites rozsdamentes acél csövekre készítettük el kézi lézeres hegesztéssel, hozaganyagot nem alkalmaztunk.

A varratok elkészítése során a kézi lézeres hegesztőpisztolyt a stabilitását biztosítandó készülékbe fogtuk be, így minimalizálva az emberi kéz bizonytalanságából eredő hibákat. Az egyenletes haladási sebességet úgy biztosítottuk, hogy a munkadarabot forgató berendezéssel forgattuk.

Az alapanyag EN 10088-1:2014 szabvány szerinti százalékos kémiai összetétele az **1. táblázat**ban látható.

1. táblázat. Az 1.4301 anyagminőségű ausztenites rozsdamentes acél százalékos kémiai összetétele [6]

C	Si	Mn	P	S
≤0,07	≤1,00	≤2,00	≤0,045	≤0,015
N	Cr	Ni	Fe	
≤0,11	17,5–19,5	8,0–10,5	mar.	

A kísérleti varratokat az amerikai IPG Photonics Corporation nevű cég által gyártott, LightWELD XC típusú, optikai szál, kézi lézeres hegesztőgéppel készítettük el. A hegesztőgép maximálisan 1500 W teljesítményű és 1080 nm hullámhosszú monokróm, koherens és kis divergenciájú lézernyaláb előállítására képes. Modulált, azaz impulzusos üzemmód esetén egy online, számítógépről elérhető kezelőfelület biztosít lehetőséget a lézerteljesítmény, a lézernyaláb-lengetési amplitúdó és frekvencia, az impulzusfrekvencia, valamint

a kitöltési tényező beállítására. Az impulzusos üzemmódban az impulzusfrekvencia a lézeroszcillátor által másodpercenként leadott impulzusok számát jelenti, a kitöltési tényező pedig egy impulzus hosszának és adott impulzus kezdetétől a következő impulzus kezdetéig eltelt időnek az arányát fejezi ki százalékos formában. A haladási sebesség az előzetes kísérleteink alapján 80 cm/min (v), a lézerteljesítmény pedig 500 W (P) volt. A bevitt energiát a következő képlettel számoltuk:

$$E = \frac{P(kW)}{v\left(\frac{mm}{s}\right)} = \frac{0,5}{13,33} = 0,0375 \frac{kJ}{mm} \quad (1)$$

Védőgázként 4,5 tisztaságú nitrogént használtunk 18 l/min térfogatárammal. A kitöltési tényezőt 70% és 100% között 10%-onként változtattuk, a lézernyaláb-lengetési amplitúdót 0 mm (ez tehát a lengetés nélküli eset) és 2 mm között állítottuk. Az impulzusfrekvencia és a lézernyaláb-lengetés frekvenciája az 1 mm-es és a 2 mm-es esetben egyaránt 200 Hz volt. A lézernyaláb lengetése a hegesztőpisztolyon belül történik, a lézernyaláb optikai úton történő oszcilláló mozgásával [7].

A hegesztési kísérletek végeztével a próbatestből hagyományos módszerrel metallográfiai csiszolatokat készítettünk. A varratalakot maratás segítségével hívtuk elő. A maratáshoz a következő összetételű Adler marószert használtuk:

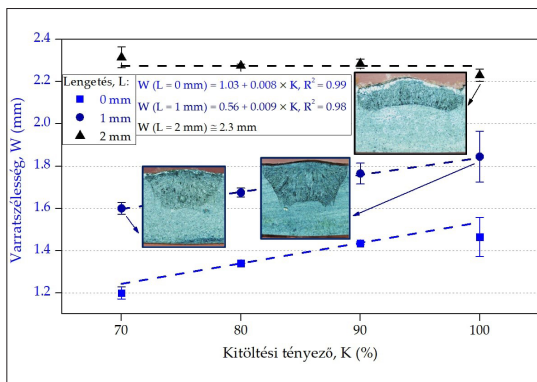
- 9 g réz-ammónium-klorid;
- 150 ml sósav;
- 45 g vas(III)-klorid 6-hidrát;
- 75 ml desztillált víz.

A mintákat 4-5 másodpercig szobahőmérsékleten maratva sikeresen láthatóvá tettük a varratok alakját, melyeket Olympus SZX 16 típusú sztereomikroszkóppal vizsgáltunk. A varratokról fényképeket készítettünk, melyeken lemértük a kiértékeléshez szükséges varratszélesség, teljes varratvastagság és varratterület értékeit.

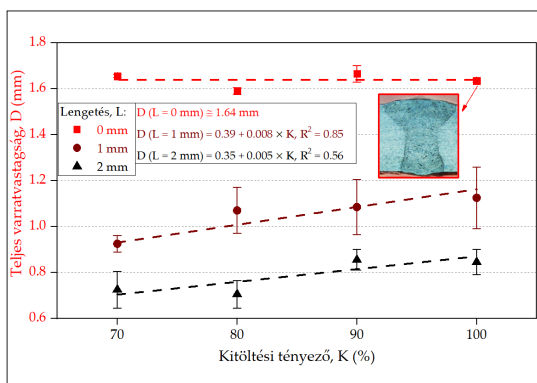
3. Eredmények és kiértékelésük

Az **1. ábra** a kialakuló varrat szélességének alakulását szemlélteti a kitöltési tényező és a lézernyaláb-lengetési amplitúdó függvényében. Megfigyelhető, hogy a 2 mm-es lengetéssel készített varratok szélessége közel állandó lett, míg az 1 mm-es lengetés esetén és a lengetés nélküli esetben a kitöltési tényező növelésével közel lineárisan nőtt a varratszélesség. A lengetési amplitúdó növelése a varratszélesség növekedését eredményezte.

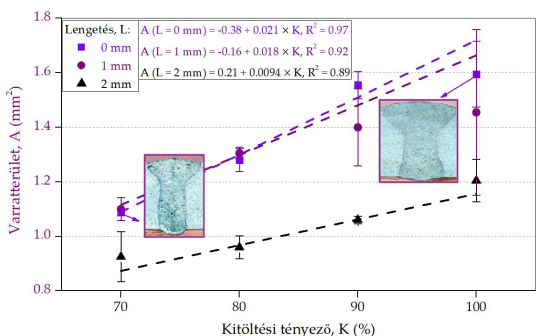
A **2. ábrán** a teljes varratvastagság alakulása látható. Megállapítható, hogy a teljes varratvastagság 2 mm-es és 1 mm-es amplitúdójú lengetés



1. ábra. Varratszélesség alakulása a kitöltési tényező és a lengetési amplitúdó függvényében, $E=0,0375$ kJ/mm bevitt energia esetén



2. ábra. Teljes varratvastagság alakulása a kitöltési tényező és a lengetési amplitúdó függvényében, $E=0,0375$ kJ/mm bevitt energia esetén



3. ábra. Varratterület alakulása a kitöltési tényező és a lengetési amplitúdó függvényében, $E=0,0375$ kJ/mm bevitt energia esetén

esetén is közel lineárisan növekszik a kitöltési tényező növelésével. Levonható továbbá a következtetés, hogy a lézernyaláb lengetése nélkül hegesztett varratok esetén a teljes varratvastagság jó közelítéssel azonos értéket vesz fel, mivel ezekben az esetekben teljes átolvadású varrat keletkezett.

A 3. ábra a varratrészlet alakulását mutatja a vizsgált paraméterek függvényében. A diagram alapján kimondható, hogy a varratok területe a lézernyaláb lengetése nélküli esetben, valamint az 1 mm-es és a 2 mm-es lengetés esetén is közel lineáris növekedést mutat a kitöltési tényező növelésével. Jól mutatja ezt a diagramra beillesztett két mikroszkópi kép. Ezen varratoknak a varratrészlet-értékeit megfigyelve megállapítható, hogy a lézernyaláb lengetése nélkül és a 70%-os kitöltési tényező beállítása mellett 1,1 mm² területű varrat, míg a 100%-os kitöltési tényező beállítása mellett 1,6 mm² területű varrat keletkezett. Érdekes megfigyelni, hogy az 1,1 mm² az 1,6 mm²-nek jó közelítéssel a 70%-a, tehát a lézernyaláb lengetése nélkül, 100%-os kitöltési tényezővel hegesztett varrat területének a 70%-os kitöltési tényező beállítása mellett hegesztett varrat területe a 70%-a.

4. Következtetések

Jelen kutatásunk során hernyóvarratokat készítettünk kézi lézeres hegesztéssel ausztenites rozsdamentes acél csövekre a kitöltési tényező és a lézernyaláb lengetésének varratgeometriára gyakorolt hatásának vizsgálata céljából. Eredményeink alapján a következő megállapítások tehetők:

- a vizsgált paraméterek mellett csak a lézernyaláb lengetése nélkül volt elérhető teljes átolvadás;
- a lézernyaláb-lengetési amplitúdó növelése a varrat szélesség növekedését eredményezte, azonban a teljes varratvastagságot és a varratrészletet csökkentette;
- a kitöltési tényező növelésével a varrat mindhárom geometriai jellemzője növekedett;
- a lézernyaláb lengetése nélküli esetben a 70%-os kitöltési tényezővel hegesztett varrat területe a 100%-os kitöltési tényező beállítása mellett hegesztett varrat területének 70%-a lett.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka elvégzéséhez szükséges alapanyagot, berendezéseket és eszközöket az Exasol Kft. bocsátotta rendelkezésünkre, melyet ezúton is köszönünk. A szerző részvételét a konferencián a Gépészmérnök-képzésért Alapítvány és a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszék támogatta.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Buza G.: *Lézersugaras technológiák I.* Edutus Főiskola, Tatabánya, 2012. 75.
- [2] Bitay E.: *Hegesztési alapismeretek.* Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2021. 58.
<https://doi.org/10.36242/mtf-16>
- [3] Klimpel A., Lisiecki A.: *Laser welding of butt joints of austenitic stainless steel AISI 321.* Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering, 25/1. (2007) 1.
- [4] ESAB Kft., Lézersugaras hegesztés.
https://esab.com/hu/eur_hu/esab-university/blogs/what-is-laser-welding-and-how-does-the-technique-work/ (letöltve: 2025. február 25.).
- [5] Gapontsev V., Stukalin F., Pinard A., Shkurikhin O., Grapov Y., Markushov I.: *Handheld laser welding and cleaning system for typical metal fabrication using 1.5 kW fiber laser source.* Proceedings Volume 11981, Fiber Lasers XIX: Technology and Systems. (2022) 1.
<https://doi.org/10.1117/12.2616585>
- [6] EN 10088-1: Stainless steels. List of stainless steels, 2014.
- [7] Sanati S., Nabavi S. F., Esmaili R., Farshidianfar A., Dalir H.: *A Comprehensive Review of Laser Wobble Welding Processes in Metal Materials: Processing Parameters and Practical Applications.* Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 11/2. (2024) 1–37.
<https://doi.org/10.1007/s40516-024-00245-w>



Fenntarthatóság rétegről rétegre: Liapor- és cellulóزالapú hőszigetelés kombinációja homlokzati falpanelben

Sustainability Layer by Layer: Combining Liapor and Cellulose-Based Insulation in a Facade Wall Panel

Szendi Dorina,¹ Tárkányi Sándor,² Kósa Balázs³

¹ Soproni Egyetem, Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar, Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola, Sopron, Magyarország, VSWG@uni-sopron.hu

² Soproni Egyetem, Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar, Kreatívipari Intézet, Sopron, Magyarország, tarkanyi.sandor@uni-sopron.hu

³ Soproni Egyetem, Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar, Kreatívipari Intézet, Sopron, Magyarország, kosa.balazs@uni-sopron.hu

Abstract

The combination of Liapor lightweight concrete wall panels and cellulose-based insulation materials represents an outstanding example of the construction industry's commitment to sustainability. The aim of this research is to present the layered integration of Liapor technology and natural-based insulation materials, combining energy efficiency with the principles of eco-conscious architecture. As a result of this integration, an innovative building structure is created, which significantly reduces the energy consumption of buildings, meets passive house standards, and provides excellent acoustic properties.

Keywords: *Liapor, cellulose, sustainability, energy efficiency, layered integration, passive house.*

Összefoglalás

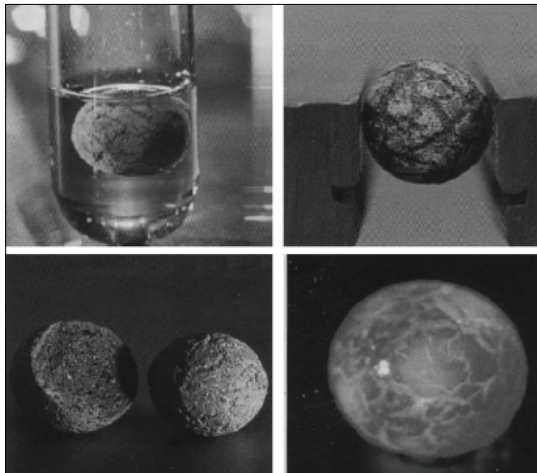
A Liapor könnyűbeton falpanelek és a cellulóزالapú szigetelőanyagok kombinációja az építőipar fenntarthatóság iránti törekvéseinek kiemelkedő példája. A kutatás célja a Liaporra alapuló technológia és a természetes alapú szigetelőanyagok rétegrendi integrációjának bemutatása, ami az energiahatékonyság és a környezettudatos építészet szempontjait ötvözi. Az integráció eredményeképpen olyan innovatív épületszerkezet jön létre, amely jelentősen csökkenti az épületek energiafogyasztását, megfelel a passzív ház iránti követelményeknek, és kiváló akusztikai tulajdonságokat nyújt.

Kulcsszavak: *Liapor, cellulóz, fenntarthatóság, energiahatékonyság, rétegrendi integráció, passzív ház.*

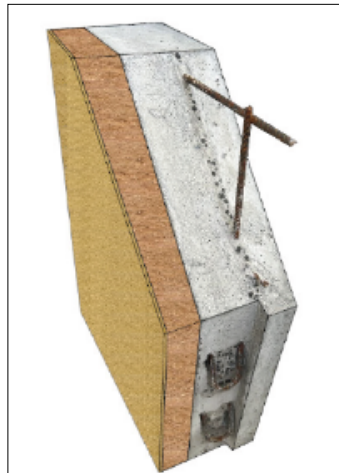
1. Bevezetés

A globális klímaváltozás, a természeti erőforrások kimerülése és a fenntarthatóság iránti növekvő társadalmi igény jelentős változásokat hozott az építészet és az építőipar világában. Az épített környezet ma már nem csupán a funkcionalitás és az esztétika szempontjából kerül megítélésre, hanem az energiahatékonyság, az anyaghasználat fenntarthatósága, valamint az ökológiai lábnyom minimalizálása is kiemelt prioritásként jelenik meg.

A hagyományos építőanyagok gyártása és felhasználása jelentős környezeti terheléssel jár, beleértve a nagy szén-dioxid-kibocsátást és a nagy mennyiségű hulladék keletkezését [1]. Az ENSZ Fenntartható Fejlődési Céljai (SDG-k) egyértelműen megfogalmazzák az ún. zöldtechnológiák előtérbe helyezésének szükségességét az építőiparban. Az előregyártott építőelemek alkalmazása, valamint a természetes és újrahasznosított anyagok beépítése kulcsfontosságú szerepet játszik a környezetterhelés csökkentésében [2].



1. ábra. Liapor kerámia mintatestek mikroszkópos vizsgálati képei



2. ábra. Liapor falszerkezet cellulóزالapú szigeteléssel

A Liapor könnyűbeton falpanelek és a cellulóزالapú szigetelőanyagok alkalmazása olyan innovatív megoldást kínál, amely nemcsak a fenntarthatósági elveket támogatja, hanem hozzájárul az energiahatékonyság javításához és az építési idő lerövidítéséhez is [3]. A kutatás célja ezen anyagok integrálási lehetőségeinek vizsgálata, különös tekintettel a szerkezeti stabilitásra, a hő- és hangszigetelési tulajdonságokra, valamint az építési költségekre gyakorolt hatásukra.

2. Anyagok és módszerek

Az alkalmazott módszertan több lépésből állt, beleértve az anyagvizsgálatokat, laboratóriumi kísérleteket és összehasonlító elemzéseket.

A vizsgált Liapor panelek alapvető összetevője az égetett agyaggranulátum, amelynek a kis testsűrűsége ($500\text{--}600\text{ kg/m}^3$) ellenére jelentős a nyomószilárdsága, elérve a $6\text{--}8\text{ N/mm}^2$ értéket. A porózus szerkezet hozzájárul a kis hővezetési tényezőhöz [kb. $0,12\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$]. A cellulóزالapú szigetelőanyagok természetes eredetűek, faipari melléktermékekből, például fűrészporból és nyárfakéregből készülnek.

A sűrűségük $35\text{--}70\text{ kg/m}^3$, a hővezetési tényezőjük $0,038\text{--}0,045\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ tartományban mozog, ami kiváló szigetelési tulajdonságokat eredményez.

A kutatás során különböző rétegrendi kombinációkat teszteltünk. A laboratóriumi mérések során az alábbi tulajdonságokat vizsgáltuk:

Hővezetési tényező: A Liapor és a cellulóزالapú szigetelés együttes alkalmazása esetén a rétegrend átlagos hővezetési tényezője $0,065\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

volt, ami jelentősen csökkenti a hőveszteséget.

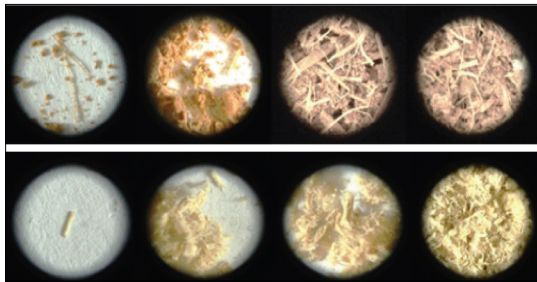
Nyomószilárdság: Az MSZ EN 826 szabvány szerint végzett vizsgálatok alapján a cellulóزالapú panelek nyomószilárdsága $110\text{--}140\text{ kPa}$ tartományban mozgott, ami megfelelő mechanikai stabilitást biztosít.

Tűzállóság: Az ISO 11925-2 szabvány szerint végzett gyúlékonysági vizsgálatok alapján a cellulóزالapú panelek D-s1, d0 tűzállósági besorolást kaptak, ami megfelelő védelmet jelent tűz esetén.

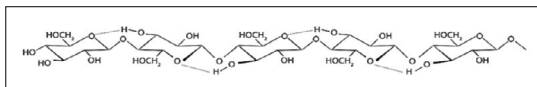
Páradiffúziós ellenállás: Az μ érték $2\text{--}5$ között mozgott, ami jó légáteresztő képességet jelent, és biztosítja a szerkezet megfelelő páratechnikai viselkedését.

Akusztikai tulajdonságok: Az 500 Hz -es frekvencián végzett hangelnyelési tesztek szerint az integrált falpanel $0,75\text{ NRC}$ (Noise Reduction Coefficient – magyarul: Zajcsillapítási Együttható) értéket ért el, ami kiváló zajcsökkentő képességet biztosít. Az anyagvizsgálatok eredményeképpen megállapítottuk, hogy a Liapor könnyűbeton és a cellulóزالapú szigetelőanyagok együttes alkalmazása nem csupán az épületek energiahatékonyságát növeli, hanem hozzájárul az élettartam növeléséhez is. A cellulóزالapú szigetelések kiválóan alkalmasak a hőszigetelési követelmények teljesítésére, ugyanakkor biztosítják a páraáteresztő képességet is, ami elengedhetetlen az épületek hosszú távú szerkezeti stabilitásának fenntartásához.

Az alkalmazott gyártási technológia lehetővé teszi az előregyártott elemek gyors és hatékony telepítését, minimalizálva az építési hulladékot és a kivitelezési időt. Az építőiparban az előregyár-



3. ábra. Nyárfakéregrost és tölgyfarost mikroszkópos vizsgálati képe



4. ábra. Cellulóz-molekula, láthatóan nagy számú hidroxilgyökökkel (https://www.ttko.hu/kb/f/tan-anyagok_html/kem_38b/index.html)

tott építőelemek alkalmazása különösen fontos az anyagfelhasználás optimalizálása és az energiahatékonyság növelése érdekében [4].

A kutatás során kifejlesztett szigetelőanyagok formázási és sűrűségi paramétereit elemeztük, hogy optimalizáljuk a mechanikai ellenálló képességet és a hőtechnikai teljesítményt. A cellulóزالapú szigetelőpanelek előállítása során alkalmazott rostosítási módszer biztosítja az egyenletes anyagszerkezetet, amely kulcsfontosságú a tartósság és a hatékonyság szempontjából. Az elért eredmények alapján a rendszer alkalmazása nemcsak az új építésekben, hanem az épületfelújításokban is ígéretes alternatívát nyújt a fenntartható építőanyagok piacán [5].

A cellulóزالapú szigetelőpanelek hővezetési tényezője körülbelül $0,05 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, ami kiemelkedően jó hőszigetelési tulajdonságokat eredményez, és versenyképes alternatívát jelent a hagyományos ásványgyapot és polisztirolalapú szigetelőanyagokkal szemben. Az anyag mechanikai stabilitását és rugalmasságát különböző nyomásállósági és terhelési tesztek segítségével vizsgáltuk, amelyek kimutatták, hogy a cellulóزالapú idomok a hagyományos építőipari felhasználás során is hosszú élettartamot és nagy szilárdságot biztosítanak.

A kutatás rámutatott arra, hogy a cellulóزالapú szigetelőanyagok és a Liapor falpanelek kombinációja hozzájárulhat az épületek fenntarthatóságának javításához azáltal, hogy csökkenti az energiateljesítményt és az építési ökológiai lábnyomot. Az ilyen rendszerek különösen előnyö-

sek lehetnek passzív házak építésénél, ahol a minimális energiafogyasztás és a kiváló hőszigetelő képesség elengedhetetlen követelmények [6].

A kutatás során különféle építőanyagokat és módszereket vizsgáltunk a fenntarthatóság, az energiahatékonyság és a szerkezeti stabilitás szempontjából. A Liapor panelek fő összetevője az égetett agyaggranulátum, amely könnyű, de nagy szilárdságú szerkezetet biztosít. A cellulóزالapú szigetelőanyagokat különböző faipari hulladékokból, például fűrészporból és kéregrostokból állítottuk elő, figyelembe véve azok termikus és mechanikai tulajdonságait.

A kutatás során kifejlesztett szigetelőanyagok formázási és sűrűségi paramétereit szintén elemeztük, hogy optimalizáljuk a mechanikai ellenálló képességet és a hőtechnikai teljesítményt. A cellulóزالapú szigetelőpanelek előállítása során alkalmazott rostosítási technológia biztosítja az egyenletes anyagszerkezetet, amely kulcsfontosságú a tartósság és a hatékonyság szempontjából. Az elért eredmények alapján a rendszer alkalmazása nemcsak az új építésekben, hanem az épületfelújításokban is ígéretes alternatívát nyújt a fenntartható építőanyagok piacán.

A Liapor könnyűbeton falpanelek alkalmazása a porózus szerkezet révén kiváló hőszigetelő tulajdonságokkal bír. E panelek kombinációja cellulóزالapú szigetelőanyagokkal innovatív építészeti megoldást eredményez, amely kitűnő energiahatékonyságot és fenntarthatóságot biztosít.

3. Eredmények és értékelésük

A kutatás során végzett mérések eredményei alapján megállapítható, hogy a Liapor könnyűbeton és a cellulóزالapú szigetelőanyagok kombinációja jelentős javulást eredményezett az építőanyagok hő- és hangszigetelő tulajdonságaiban, mechanikai szilárdságában, valamint tűzállóságában.

3.1. Hővezetési tényező

A hővezetési tényező vizsgálatai alapján megállapítható, hogy a Liapor és cellulóz kombináció esetén az érték $0,065 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ volt, amely kisebb, mint az Agepan terméké ($0,09 \text{ W/(m}^2\text{K)}$). Ez a kisebb érték azt jelenti, hogy a vizsgált rétegrend jobban ellenáll a hővesztésnek, ezáltal hatékonyabban segíti az épületek energiatakarékosságát. A porózus szerkezet és az anyagok kombinációja csökkenti a hőhidak kialakulását, így hosszú távon optimalizálja az épületek hőtechnikai teljesítményét [7].

3.2. Nyomószilárdság

Az MSZ EN 826 szabvány szerinti vizsgálatok alapján a cellulóزالapú panelek 110–140 kPa közötti nyomószilárdságot mutattak, ami kedvezőbb, mint a piacon levő Agepan-paneleké (100–120 kPa). Ez azt jelenti, hogy a cellulóz és Liapor rétegrend mechanikai ellenálló képessége nagyobb, így stabilabb és tartósabb épületszerkezeti elemek létrehozását teszi lehetővé. Az eredmények alapján a rendszer jobban ellenáll a nyomóterheléseknek, így nagyobb szerkezeti integritást biztosít [8].

3.3. Tűzállóság

Az ISO 11925-2 szabvány szerinti vizsgálatok alapján a cellulóزالapú panelek D-s1,d0 tűzállósági besorolást kaptak, míg az Agepan-panelek csupán E besorolásúak. Ez azt jelzi, hogy a vizsgált kombináció jobban ellenáll a tűzterhelésnek, azaz lassabban gyullad meg, és kevesebb éghető anyagot bocsát ki. A nagyobb tűzbiztonság miatt ez az építőanyag különösen alkalmas lehet lakóépületek esetében [9].

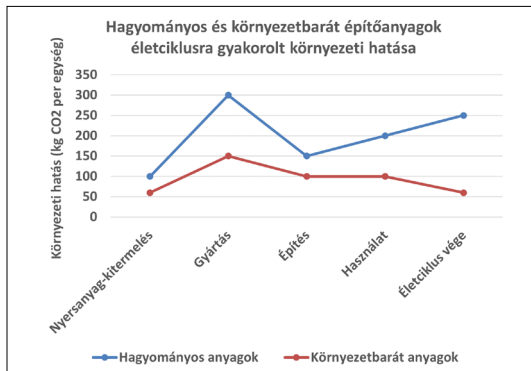
3.4. Páradiffúziós ellenállás

A vizsgálatok során a rétegrend μ értéke 2–5 között mozgott, ami optimális páratechnikai tulajdonságokat biztosít. Az Agepan-panelek esetében ez az érték kisebb (1,8–3), ami arra utal, hogy a Liapor-cellulóz kombináció hatékonyabban kezeli a nedvességet. Ez különösen fontos olyan épületekben, ahol a megfelelő páraszabályozás elengedhetetlen a szerkezeti tartósság és a beltéri komfort érdekében.

3.5. Akusztikai tulajdonságok

Az 500 Hz-es frekvencián végzett hangelnyelési tesztek alapján az integrált falpanel 0,75 NRC értéket ért el, míg az Agepan panelek csupán 0,55 NRC értéket mutattak. Ez azt jelenti, hogy a Liapor-cellulóz kombináció hatékonyabban csökkenti a zajszennyezést, ami különösen előnyös lehet a lakóépületekben.

Az eredmények egyértelműen bizonyítják, hogy a Liapor és cellulóزالapú építőanyagok rétegrendi integrálása nemcsak az energiahatékonyságot növeli, hanem hozzájárul az épületek szerkezeti stabilitásához és fenntartható építési megoldásokhoz. A nagyobb mechanikai ellenállás, a kedvezőbb páratechnikai tulajdonságok és a nagyobb tűzbiztonság mind azt igazolják, hogy ez az anyagkombináció hosszú távon is megbízható és versenyképes alternatívát kínál az építőipar számára.



5. ábra. Hagyományos és környezetbarát építőanyagok életciklusa

4. Következtetések

A Liapor könnyűbeton falpanelek és a cellulóزالapú szigetelőanyagok kombinációja ígéretes alapot nyújt a fenntartható építészeti megoldások fejlesztéséhez [10]. Az eddigi eredmények számos előnyt mutattak, különösen a hőszigetelési, mechanikai stabilitási és tűzállósági szempontok tekintetében. A kutatások igazolták, hogy ez az anyagkombináció hatékonyan csökkenti az épületek energiafogyasztását, miközben növeli azok élettartamát és biztonságát.

A jövőbeli kutatások egyik legfontosabb iránya a rétegrendi integráció optimalizálása, hogy az egyes anyagok közötti kölcsönhatások még jobban kihasználhatók legyenek. Kiemelt figyelmet kell fordítani a cellulóزالapú szigetelőanyagok újrahasznosításának lehetőségeire, különösen az épületek bontása után keletkező hulladék kezelésére, amely hozzájárulhat az építőipar körforgásos gazdaságának kialakításához [11].

Emellett érdemes tovább vizsgálni a Liapor és cellulóz kombinációjának adaptálhatóságát különböző éghajlati viszonyokhoz, így a szélsőséges hőmérsékleti és páratartalom-változásokhoz való alkalmazkodóképességet is fejleszteni lehetne. Az épületszimulációs modellek bevonása szintén lehetőséget teremthet arra, hogy már a tervezési fázisban előre jelezzék a rétegrendek energiahatékonyságát és szerkezeti viselkedését [12].

Összességként elmondható, hogy a Liapor alkalmazása és a cellulóزالapú szigetelőanyagok kombinációja jelentős előrelépést jelent a fenntartható építészet területén. Az új technológiai fejlesztések és anyagkombinációk további kutatása nemcsak az építőipar fejlődését segítheti elő, hanem hosszú távon hozzájárulhat a klímavédelemhez és az energiahatékony építési megoldások elterjedéséhez.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Ertsey A., Medgyasszay P.: *Fenntartható építészet*. TERC Kiadó, Budapest, 2017. ISBN: 978-6155445422.
- [2] Bozsaky D.: *Természetes és mesterséges hőszigetelő anyagok összehasonlító vizsgálatai és elemzése*. PhD-disszertáció. Széchenyi István Egyetem, Győr, 2011. 17–22.
- [3] Halász A.: *Liapor, a jövő építőanyaga*. Magyar Építéstechnika, 41/10. (2003) 11. ISSN: 1216-6022.
- [4] Borzák Balarám B.: *Liapor könnyű készbeton*. Magyar Építéstechnika, 42/10. (2004) 35. ISSN 1216-6022.
- [5] Mohácsiné Ronyecz I.: *Természetes fakéreg anyagok hőszigetelési tulajdonságainak vizsgálata és fejlesztése*, 2015. 75–77.
- [6] Ece N.: *Building Biology Criteria and Architectural Design*. Birkhäuser, Basel–Berlin, 2018. ISBN 978-3-0356-1040-6.
- [7] Mészáros Zs.: *Új építőanyagok*. MM Műszaki Magazin, 18/7–8. (2008) 8. ISSN 1417-0132.
- [8] Törőcsik N.: *A könnyűbeton: a hőszigetelés és hővédelem régi-új technológiája*. Építési Piac – Gyorsjelentés, 38/6. (2004) 59–62. ISSN 1218-0084.
- [9] Burger B., Joób F. T.: *LIAPOR kerámiagyöngy*. Magyar Építéstechnika, 33/4. (1995) 31. (1. bekezdés). ISSN 1216-6022.
- [10] Benyus J. M.: *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. William Morrow Paperbacks, New York, 2002. ISBN 978-0060533229.
- [11] Németh K. (1998): *A faanyag degradációja*. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Papíripari műszaki-gazdasági tájékoztató, Papíripari vállalat kutató intézet (1980/5.), 93–97.
- [12] Molnár S.: *Magyarországi erdők fafajcsoport megoszlása*. In: Fahasznosítás Magyarországon. NYME Kiadvány, Sopron, 2008. 78.



Alternatív eljárás irányított szállal erősített szintaktikus fémhabok gyártására

An Alternative Process for the Production of Oriented Fibre Reinforced Syntactic Metal Foams

Szovák Benedek,^{1,2,a} Kemény Alexandra,^{1,2,b} Orbulov Imre Norbert^{1,2,c}

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, szovak.benedek@edu.bme.hu

² MTA-BME Lendület Nagyteljesítményű Kompozit Fémhabok Kutatócsoport, Budapest, Magyarország

^a szovak.benedek@edu.bme.hu, ^b kemeny.alexandra@gpk.bme.hu, ^c orbulov.imre.norbert@gpk.bme.hu

Abstract

Metal foams are cellular materials with outstanding specific mechanical properties, such as high specific energy absorption capacity, owing to its cellular structure. Metal foams are cellular materials with good specific mechanical properties, such as high specific energy absorption, owing to the metal matrix. The aim of this study is to simplify the reinforcement of syntactic metal foams with directional fibres. In previous studies, the fibres were positioned using an external orientation frame. To avoid this, reinforcing material layers in a prefabricated mesh form were placed in the crucible, which is thus perpendicular to the direction of the casting. The fabrication resulted in syntactic metal foam samples reinforced with fibres oriented along two axes.

Keywords: *metal foam, syntactic foam, fibre reinforcement.*

Összefoglalás

A fémhabok cellás szerkezetű anyagok, amelyek a fém mátrixnak köszönhetően jó fajlagos mechanikai tulajdonságokkal, például nagy fajlagos energiaelnyelő képességgel rendelkeznek. A kutatás célja a szintaktikus fémhabok irányított szállal történő megerősítésének egyszerűsítése. Korábbi vizsgálatok során a szálakat egy külső orientáló keret segítségével helyeztük el. Ennek elkerülése érdekében előre elkészített hálós formában helyeztük el az erősítőanyag-rétegeket, amelyek így merőlegesek az öntés irányára. A gyártás eredményeként két tengely mentén irányított szállal erősített szintaktikus fémhabmintákat kaptunk.

Kulcsszavak: *fémhab, szintaktikus fémhab, szálerősítés.*

1. Bevezetés

Napjainkban egyre növekszik az igény olyan anyagokra, amelyek kis sűrűség mellett nagy szilárdságúak. Hagyományos anyagokkal, például fémekkel és kerámiákkal ezek az egyre szigorúbb elvárások nem minden esetben teljesíthetőek.

Két irányból közelíthető meg a probléma: vagy a nagy szilárdságú anyagok tömegét kell csökkenteni, vagy a kis tömegű anyagok szilárdságát növelni. Ezekre alkalmas a kompozit anyagok alkalmazása, amelyek ötvözik a nagy szilárdságú és a kis tömegű anyagokat oly módon, hogy azok kompenzálják egymásnak a támasztott igények-

kel szembeni hiányosságait, miközben kihasználják az előnyeiket.

1.1. Kompozitok

A kompozit anyag olyan anyagok kombinációja, amelyek összetételükben vagy formájukban makroszinten különböznek egymástól. Az alkotóelemek megtarthatják identitásukat. Általában az alkotórészek fizikailag azonosíthatók, és van közöttük egy határfelület [1]. Az alkotórészek a nagy szilárdságú erősítőanyag, amely képes felvenni a terhelést, míg a mátrixanyag összefogja az erősítőanyag egységeit, továbbítja a terhelést azok-

nak, illetve védi azokat a környezeti hatásokkal szemben. A két fő alkotórész közti kapcsolat nagy jelentőséggel bír, a kialakuló kötés erőssége befolyásolja a kompozit viselkedését. Kialakulhat átmeneti réteg, ennek hatása azonban sok esetben nem előnyös a felhasználás szempontjából [2–4].

Alumínium mátrixú kompozitok esetén vizsgálják különböző erősítőanyagok hatását, ezek az erősítőanyagok lehetnek szemcséként, szálakként, szálkötvekként vagy paplan formában alkalmazva [5–7]. A szálerősítés esetén lehet vágott, rövid szál, ami véletlenszerű elrendeződése miatt a szemcsékhez hasonlóan minden irányban ugyanolyan mértékben fejti ki hatását. Valamint lehet irányított szállal erősített a kompozit [8, 9], ebben az esetben csak a szálak tengelyének irányába fejti ki hatást az erősítőanyag, de nagyobb mértékű az erősítő hatás.

1.2. Fémhabok

A fémhabok olyan cellás szerkezetű anyagok, amelyekbe nem erősítőanyagot alkalmaznak, hanem cellás belső szerkezetet alakítanak ki a tömeg csökkentése érdekében [10]. A belső cellás szerkezet alapján csoportosíthatóak nyílt cellás szerkezetű habokra, amelyekben a belső cellák átjárhatóak [11], illetve zárt cellás szerkezetű habokra, amelyekben az egyes cellákat cellafal választja el egymástól [12]. A zárt cellás szerkezetű habok alcsoportját képezik a szintaktikus habok, ezekben a porózus szerkezetet töltőanyagként az olvadt mátrixba történő bejuttatásával alakítják ki [13]. A szintaktikus fémhabok a kompozit anyagok csoportjába tartoznak. A kis sűrűség miatt nagy fajlagos mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, azonban a cellás szerkezet miatt húzó igénybevételnek nem állnak ellen.

1.3. Célkitűzés

Korábbi kutatásainkban [14, 15] az öntés irányával párhuzamosan elhelyezett szálerősítést vizsgáltuk a húzással szembeni igénybevétel növelése érdekében. Azonban ennek a struktúrának a létrehozása egy bonyolult gyártási eljárást vont maga után. Ebben a munkában egy egyszerűsített gyártási eljárás lehetőségét vizsgáltuk, aminek eredményeképpen két tengely mentén irányított szállal erősített szintaktikus fémhabmintákat kaptunk.

2. Felhasznált anyagok

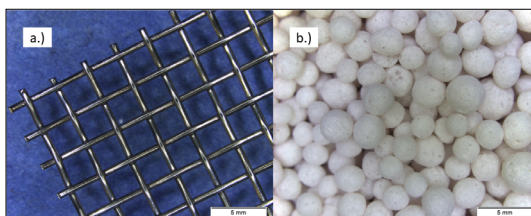
Mátrixanyagként Al99,5 kohóalumíniumot választottunk nagy képlékenysége miatt. Az alumínium pontos összetételét WAS PMI-MASTER SORT

optikai spektrométerrel (Worldwide Analytical Systems AG, Uedem, Németország) mértük meg, az összetételt mutatja be az **1. táblázat**.

1. táblázat. Az Al99,5 mátrixanyag átlagos összetétele

Elem	Tömeg %
Al	99,5
Si	0,0293
Fe	0,335
Cu	<0,0050
Mn	<0,0050
Mg	<0,0010
Zn	0,0100
Cr	<0,0050
Ni	0,0108
Ti	<0,0010
Sn	0,0367

Cellaképző anyagként Ø2,87±0,50 mm méretű duzzasztott üveggyöngyöt használtunk, amelyet a Stikloporas cégtől (Stikloporas UAB, Druskinikai, Litvánia) szereztünk be. Erősítőanyagként 1.4307 (X2CrNi18-9) rozsdamentes acél hálót alkalmaztunk Ø0,64±0,02 mm szálátmérővel, ezt a Jurotissu Kft.-től (Jurotissu Kft., Budapest, Magyarország) szereztük be. Az erősítőhálót és a töltőanyagot mutatja az **1. ábra**.



1. ábra. a) Erősítőháló és b) töltőanyag

3. Egyszerűsített gyártási eljárás

A töltőanyagot, illetve az erősítőanyagot 60×60×380 mm befoglaló méretű, 2 mm falvastagságú szénacél téglébe rétegeztük. Az erősítőanyagként felhasznált hálódarabok egymástól az öntés irányának tengelyén vett távolságát a töltőanyag térfogatának alapján mértük ki: a 10 mm magas töltőanyagréteg elméleti térfogata 31,36 ml. Ezt a kivitelezés során 31 ml-re kerekítettük, amelyet mérőhenger segítségével mértünk ki. Ennek a töltőanyag-mennyiségnek a betöltése után kézi rezgetést alkalmaztunk, hogy a felület merőleges legyen az öntés tengelyére. Ezt hét alka-

lommal ismételtük meg, majd az utolsó hálóréteg fölé referenciaminták készítéséhez 95 ml (30 mm vastag réteg) töltőanyagot helyeztünk. A rétegzés lépéseit a **2. ábra** mutatja be.

Az elkészült töltetet felülről szintén acélhálóval zártuk le, hogy megakadályozzuk a töltőanyag-részecskék infiltrálás közbeni elmozdulását. A tégelyt 550 °C-ra hevítettük Prothermo Hoffmann B-70 típusú kamrás kemencében (Prothermo Hoffmann Kft., Kecskemét, Magyarország), és ott 1,5 órán át hőn tartottuk. A mátrixot Inductor IF-15 típusú indukciós olvasztókemencében (Inductor Kft., Diósd, Magyarország) 750 °C-ra hevítettük. Az olvadék hőmérsékletét Maxthermo MD-3003 K típusú (MAXIMUM ELECTRONIC CO., LTD., Taipei Hsien) hőmérővel mértük. Az olvadt mátrixot beleöntöttük a tégelybe, majd 400 kPa (4 bar) nyomással, argongázzal elvégeztük az infiltrálást. A tégelyt szabad levegőn hűtöttük szobahőmérsékletre.

Az elkészült tömbből próbatesteket munkáltunk ki, amelyek közül egyeseket csiszoltunk P80-P4000 csiszolópapírral és políroztunk 1 µm szemcseméretű gyémántsuszpenzióval mikroszkópi vizsgálat céljára.

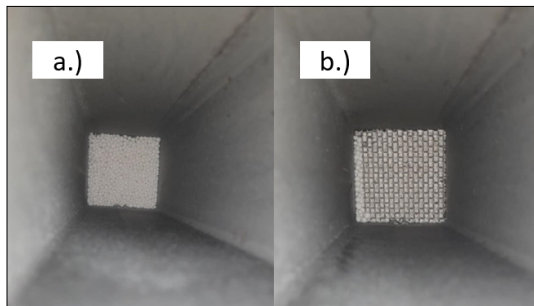
4. Eredmények

A sűrűséget a geometriai méretek és a tömeg alapján határoztuk meg. Ennek értéke az erősített mintákesetén $1,63 \pm 0,06 \text{ g/cm}^3$, az erősítőszálakat nem tartalmazó referenciaminta esetén $1,26 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$. Az erősítőszálak alkalmazása 23%-ban növelte a sűrűséget.

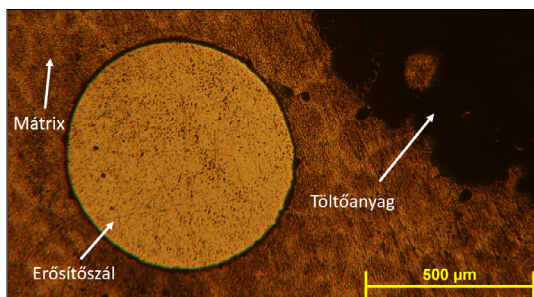
Az elkészült szerkezet fémmikroszkópi felvételét mutatja a **3. ábra**. Az elhelyezett erősítőhálórétegek távolságát sztereomikroszkópi felvételen határoztuk meg az egymáshoz az öntés tengelye mentén legközelebb elhelyezkedő szálak között, ezt szemlélteti a **4. ábra**. A szálak átlagos távolsága $9,55 \pm 0,55 \text{ mm}$. Ez a tervezett 10 mm-es távolságtól való eltérést a töltőanyag térfogatának kimérése során fellépő kerekítés, mérési pontatlanság és a tégely nagyobb felülete miatti jobb tömörödés okozza.

5. Következtetések

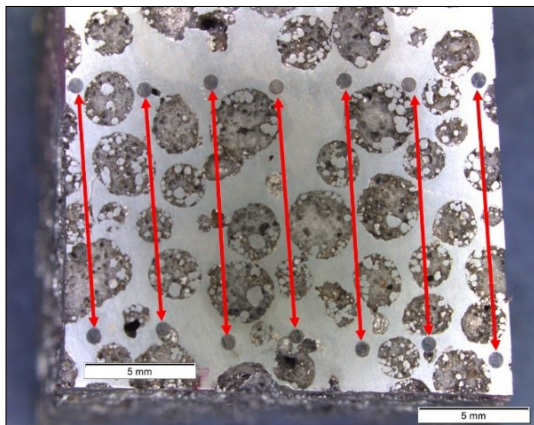
- A kutatás során megállapítottuk a következőket:
- a kisnyomású infiltrálás (400 kPa) alkalmas eljárás irányított szállal erősített szintaktikus fémhab előállítására;
 - az alkalmazott eljárás jelentősen leegyszerűsíti a gyártást az eddigi kutatásokban alkalmazott módszerekhez képest;



2. ábra. a) A töltőanyagréteg és b) az erősítőháló elhelyezése a tégelyben



3. ábra. Acélhálóval erősített szintaktikus fémhab szerkezetének keresztmetszeti képe



4. ábra. Erősítőrétegek szálai közti távolság szemléltetése keresztmetszeti képen

- az elkészült szerkezet érdemes további vizsgálatok elvégzésére, elsősorban a szakítási és a zömítési tulajdonságok feltérképezése érdekében;
- az előre elkészített háló erősítőanyagként történő alkalmazása érdemes további vizsgálatokra, nagyobb méretű darabok esetén az öntés irányával párhuzamos szálorientációval a szakítási és hajlítási tulajdonságok vizsgálatához.

Köszönetnyilvánítás

A publikációt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatala támogatta az EKÖP-24-3-BME-4 ösztöndíjpályázat keretein belül.

Ezt a munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatta az OTKA-FK_21 138505 támogatási szerződés keretében.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] ISO 21347:2005 – Space systems – Fracture and damage control, 2005.
- [2] Kumar N., Chittappa H. C., Ezhil Vannan S.: Development of Aluminium-Nickel Coated Short Carbon Fiber Metal Matrix Composites. *Materials Today: Proceedings*, 5. (2018) 11336–11345. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.100>.
- [3] Máté P., Szekrényes A.: The Effect of the Layout on the Stability of Composite Cylindrical Shells. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 68/4. (2024) 291–303. <https://doi.org/10.3311/PPme.23424>.
- [4] Kun K., Bata A., Ronkay F.: Investigation of the Replication Quality of Microstructures on Injection Moulded Specimens Made from Recycled Polypropylene Composites Reinforced with Carbon Nanotubes. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 68/3. (2024) 247–53. <https://doi.org/10.3311/PPme.37288>.
- [5] Zaiemyekheh Z., Liaghat G. H., Ahmadi H., Khan M. K., Razmkhah O.: Effect of strain rate on deformation behavior of aluminum matrix composites with Al₂O₃ nanoparticles. *Materials Science & Engineering A* 753. (2019) 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.052>.
- [6] Vijayaram T. R., Sulaiman S., Hamouda A. M. S., Ahmad M. H. M.: Fabrication of fiber reinforced metal matrix composites by squeeze casting technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 178. (2006) 34–8. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.026>.
- [7] Bedmar J., Torres B., Rams J.: Manufacturing of Aluminum Matrix Composites Reinforced with Carbon Fiber Fabrics by High Pressure Die Casting. *Materials*, 15. (2022) <https://doi.org/10.3390/ma15093400>.
- [8] Zhao H., Yuan T., Zeng C., Peng W., Sun Z., Hu H.: Microstructure and mechanical properties of steel wire reinforced Mg matrix composites fabricated by composite extrusion. *Composites Communications*, 43. (2023) 101711. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2023.101711>.
- [9] Almeida J. H. S., Miettinen A., Léonard F., Falzon B. G., Withers P. J.: Microstructure and damage evolution in short carbon fibre 3D-printed composites during tensile straining. *Composites Part B*, 292. (2025) 112073. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.112073>.
- [10] Marx J., Rabiei A.: Overview of Composite Metal Foams and Their Properties and Performance. *Advanced Engineering Materials*, 19. (2017) 1–13. <https://doi.org/10.1002/adem.201600776>.
- [11] Johnson Q. C., Kenesei P., Petruzza S., Plumb J., Sharma H., Park J. S. és mtsai.: Mapping 3D grain and precipitate structure during in situ mechanical testing of open-cell metal foam using micro-computed tomography and high-energy X-ray diffraction microscopy. *Materials Characterization*, 195. (2023) 112477. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112477>.
- [12] Naeem M. A., Gábora A., Mankovits T.: Influence of the manufacturing parameters on the compressive properties of closed cell aluminum foams. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 64. (2020) 172–8. <https://doi.org/10.3311/PPME.16195>.
- [13] Kincses D. B., Károly D., Bukor C.: Production and testing of syntactic metal foams with graded filler volume. *Materials Today: Proceedings*, 45. (2020) 4225–4228. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.163>.
- [14] Szovák B., Maróti J. E., Kemény A., Orbulov I. N.: Unidirectional fibre reinforcement of syntactic metal foams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1313. (2024). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1313/1/012005>.
- [15] Szovák B., Kemény A., Orbulov I. N.: Unidirectional steel wire reinforced metal matrix syntactic foams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1319. (2024). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1319/1/012007>.



A szorítónyomás hatása nikkelbevonatos rézlemez és alumíniumlemez között ultrahangos hegesztés közben

Effect of Welding Pressure During Ultrasonic Welding Between Nickel-Plated Copper and Aluminium Sheets

Zamiul Alam Md,¹ Schramkó Márton,² Kovács Tünde Anna³

¹ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, zamiulalam22@stud.uni-obuda.hu

² Óbudai Egyetem, Anyagok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest, Magyarország, schramko.marton@bgk.uni-obuda.hu

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

Abstract

This study investigates the effect of welding pressure on ultrasonic welding of aluminium sheet and nickel-plated copper sheet. Both specimens were 60×10×0.5 mm in size with a 10 mm overlap and the coating thickness was 8–12 μm. The experiment was performed at different welding pressures from 0.14 MPa to 0.31 MPa while maintaining constant welding energy, time and amplitude. The results showed that the highest tensile strength of 380 N was achieved at a welding pressure of 0.14 MPa, while higher pressures caused a decrease in the tensile strength, which is believed to be due to internal cracks and hardening. To achieve the strongest bond, the optimal welding pressure was determined to be 0.14 MPa.

Keywords: ultrasonic welding, welding pressure, tensile strength, welding defects, plated copper.

Összefoglalás

Jelen cikk a szorítónyomás hatását vizsgálja az alumíniumlemez és nikkelbevonatú rézlemezek ultrahangos hegesztésére. Mindkét próbatest mérete 60×10×0,5 mm, 10 mm átfedéssel, a bevonat vastagsága pedig 8–12 μm volt. A kísérletet 0,14 MPa-tól 0,31 MPa-ig különböző szorítónyomások mellett végeztük, miközben állandó hegesztési energiát, időt és amplitúdót tartottak. Az eredmények azt mutatták, hogy a legnagyobb, 380 N-os szakítóerőt 0,14 MPa szorítónyomás mellett érte el, az ennél nagyobb nyomások pedig a szakítóerő csökkenését okozták, aminek oka vélhetően a belső repedések és keményedés lehet. A legerősebb kötés eléréséhez az optimális szorítónyomást 0,14 MPa-ban határoztuk meg.

Kulcsszavak: ultrahangos hegesztés, szorítónyomás, szakítóerő, hegesztési hibák, bevonatolt réz.

1. Bevezetés

Az ultrahangos hegesztést a 20. század közepén fejlesztették ki, kezdetben a repülőgépiparban alkalmazott ponthegeztés kiváltásának érdekében. A merev műanyagok hegesztési alkalmazása azonban csak az 1960-as években jelent meg. A hőre lágyuló műanyagok ultrahangos hegesztésének eljárása már ezelőtt létrejött. Az ultrahangos hegesztést véletlenül fedezte fel Robert Soloff,

a Sonics & Materials Inc. alapítója 1963-ban, akinek sikerült egy műanyag szalagadagolót ultrahangos hegesztővel összehegesztenie. 1965-ben Soloff munkatársával, Seymour Linsley-vel szabadalmat kapott erre a módszerre, amivel kulcsfontosságú szerepe lett az eljárás fejlődése szempontjából. Soloff fejlesztette ki az első ultrahangos hegesztőgépet, és egy fűrógép átalakításával létrehozta az első automatizált ultrahangos

hegesztőgépet, amelyet kezdetben a játékiparban használtak [1].

Az ultrahangos hegesztés szilárd fázisú hegesztési eljárás, amely nagyfrekvenciás ultrahangos rezgéseket használ anyagok, elsősorban fémek és műanyagok összeillesztésére, és nem igényel hőt, hozaganyagot vagy ragasztókat. A működése a rezgések és az anyagokra ható szorítóerő kombinációjával történik. Ez alumínium- és rézfóliák, vékony lemezek hegesztésére is használható, mivel környezetbarát, megbízható és gyors, míg az ömlesztőhegesztési eljárások nem könnyen alkalmazhatók erre a célra [2–4].

Az ultrahangos hegesztőberendezések jellemzően 15 kHz és 80 kHz közötti frekvenciatartományban működnek. Vékonyabb anyagokhoz jellemzően nagyobb frekvenciákat, vastagabb anyagokhoz pedig kisebb frekvenciákat alkalmaznak [4].

Az ultrahanghullámok a diszlokációsűrűség módosításával módosíthatják a varratok mechanikai tulajdonságait (keménység és szakítószilárdság). Az említett tulajdonságok javításához azonban optimalizálni kell az ultrahangos hegesztés teljesítményét. Alumínium-réz kötések hegesztésekor a megfelelő összeszorításra, amplitúdóra és energiára kulcsfontosságú a megfelelő paraméterválasztás a kíváló minőségű hegesztések eléréséhez. Az eljárás 4 fő csoportba osztható az ISO 4063 alapján, vagyis annak alapján, hogy milyen anyagcsoporton milyen módon végzünk hegesztést. Az eljárás két fő fajtát különböztethetjük meg a folyamat elvégzése alapján: a ponthegeztést és a folyamatos hegesztést, amelyeket az alkatrész méretétől és összetettségétől függően speciális alkalmazásokhoz használnak. A ponthegeztés egyszerűbb és kis alkatrészekhez, a folyamatos hegesztés pedig nagy és összetett munkadarabokhoz használható [3, 5].

Az ultrahangos hegesztést nagy hatékonysága és sokoldalúsága miatt számos iparágban alkalmazzák. Széles körben elterjedt az autóiparban olyan alkatrészek összekapcsolására, mint az elektromos csatlakozók és a kábelkötegek, vagy olyanokéra, amik gyors és hőmentes megoldást kínálnak. Az elektronikai iparban, minimális hőbevitelle miatt, mikroáramkörök és félvezető alkatrészek összekapcsolására használják. Az orvostudományban, az orvosi termékek sterilítása és integritása érdekében, légmentes csomagolás lezárására használják. Ezen kívül buborékcsoomagolásokban és biztonsági zárás biztosítására is használják. Ez a hegesztés figyelemre méltó a repülőgépipari alkalmazásokban is, kompozit szerkezetek és hőre lágyuló műanyagok össze-

kapcsolására a szilárdság-tömeg arány javítása érdekében. Ezen kívül a különböző anyagok összekapcsolására való képessége több lehetőséget kínál különböző iparágakban a terméktervezésben és a testre szabásban [6, 7].

Az ultrahangos hegesztés számos előnnyel rendelkezik más hegesztési módszerekkel szemben, például különböző anyagok, például alumínium és réz, valamint ezek bevonattal történő hegesztésére. Az Al-Cu kötéseknel szilárd fázisú kötést hoz létre, ami tökéletes a lítium-ion akkumulátor-csomagok gyártásához, mivel kisebb hőterhelés mellett köti össze az anyagokat. Műanyagok esetében az ultrahangos hegesztés nagyfrekvenciás hanghullámokat használ kötés kialakításához; ez a folyamat nagyon tiszta és hatékony, és helyes paraméterek mellett elhanyagolható hőkárosodással jár [7–11].

2. Anyag és módszertan

A kísérlet az összeszorító erő hatását vizsgálja Al- és Ni-bevonatú Cu ultrahangos hegesztésére. Az eljárás kedvező, mert a két anyag egyesítéséhez nincs szükség nagy energiabevitelre az eljárás során.

Shakil és munkatársai számos kísérletet végeztek az optimális ultrahangos hegesztési paraméterek meghatározására. Alumíniumötvözetet és rozsdamentes acélt használtak a kísérlethez, és kijelentették, hogy a nagyobb összeszorító erő rövidebb hegesztési időt és kisebb energiát igényel, mint a kisebb összeszorító erő, ugyanazon szakítószilárdság elérése mellett. Ezen szakirodalmi eredmények alapján építettük fel a kísérleteket [12].

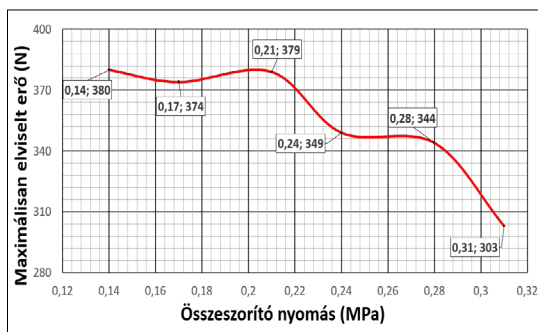
A kísérletet 0,14 és 0,31 MPa szorítóerő között, 0,035 MPa lépésekben változtatva végeztük el, a hegesztési energiát, időt és a hegesztés amplitúdóját állandó értéken tartva. A hegesztési energia 100 J, a hegesztési idő 1,20 másodperc, az alkalmazott amplitúdó pedig 45 μm volt. Mind az alumínium-, mind a nikkelbevonatú rézminták hossza 60 mm, szélessége 10 mm és vastagsága 0,5 mm volt, 10 mm átfedéssel, ami 100 mm^2 átfedési területet eredményezett. A nikkelbevonat átlagosan 8–12 μm vastagságú volt.

A vizsgálat elvégzéséhez egy Branson (Ultraweld L20) ultrahangos hegesztőgépet (1. ábra) használtunk a mintavarratok kialakításához, a vizsgálatokhoz pedig szakítógépet.

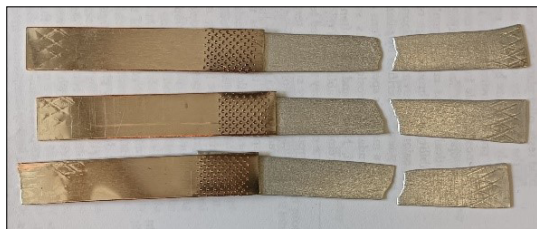
A szorítónyomás változtatása kulcsfontosságú ebben a kísérletben, mivel ez befolyásolja a varrat szilárdságát és minőségét. Összességében



1. ábra. Ultrahangos hegesztőgép



2. ábra. A szakadáshoz szükséges erő és a hegesztési összeszorító nyomás diagramja



3. ábra. Kisebbs nyomáson hegesztett mintadarabok



4. ábra. Nagyobb nyomáson hegesztett mintadarabok

a kísérlet célja az volt, hogy meghatározza a szorítónyomás hatását az Al- és Ni-bevonatú Cu ultrahangos hegesztési folyamatára, szabályozott beállítás és állandó paraméterek alkalmazásával.

3. Eredmények

3.1. Az összeszorító erő hatása

Az Al- és Ni-bevonatú Cu ultrahangos hegesztésekor a szakítóerő alakulását és a hegesztés közbeni nyomásösszefüggést elemeztük, amit a hegesztési nyomás – szakadási erő görbe szemléltet (2. ábra). Az összeszorítás mértéke 0,14 MPa és 0,31 MPa között változott, a szakítóerőt pedig minden szorítónyomásszinthez tartozó három minta átlagaként mértük.

Az ábra azt mutatja, hogy a legnagyobb szakítóerőt a vizsgált legkisebb szorítónyomásnál, 0,14 MPa-nál értük el, 380 N szakítóerő mellett. Bár 0,17 MPa-nál kissé visszaesik 374 N-ra, az általános tendencia a szakítóerő folyamatos csökkenését mutatja, ahogy a szorítónyomás növekszik. A legkisebb szakítóerő 0,31 MPa-nál található, ahol az erő értéke 303 N.

Ezek az eredmények arra utalnak, hogy a nagyobb szorítónyomás negatívan befolyásolja a hegesztési szilárdságot, valószínűleg az anyag deformációja vagy károsodása miatt. A szakítóerő szempontjából optimális szorítónyomás ebben a kísérletben 0,14 MPa volt, ami a kísérleti körülmények között a legnagyobb, 380 N szakadási erő eredményezte.

3.2. A szorítónyomás hatása a szakadás helyére

A törés helyének elemzése azt mutatta, hogy a szorítónyomás a kötés integritására kedvezőtlenül hat, ha mást nem módosítunk. A 3. ábrán látható, hogy a 0,14 MPa nyomáson hegesztett daraboknál az alumíniumlemez szakadt el a szakítópróba során, ami azt jelzi, hogy a kötés szilárdsága nagyobb, mint az alumíniumé. A 0,31 MPa nyomáson hegesztett daraboknál, amiket az 4. ábra mutat, a hegesztési varrat szakadt el, ami a kötés szilárdságának romlását jelzi a túlzott szorítónyomás miatt.

Az adatok korrelálnak a szakadási erő méréseivel, megerősítve, hogy 0,14 MPa hegesztési nyomás mellett a kötés az alapanyagban törik, ami erős kötésre utal. A túl nagy szorítónyomás nem alkalmas a megfelelő kötés kialakítására, mivel a szakadás helye a kötésben vagy közvetlen környezetében van. Az elfogadható kötéseknel jellemzően az alapanyag törik, míg a hibás paraméterek

esetén a varrat közvetlen környezetében, esetleg a varratban alakul ki a törés. Ez arra enged következtetni, hogy hibás paraméterek esetén a kötésben túl gyenge kapcsolat alakul ki, vagy a környezet károsodik a hegesztés során, ezzel roncslva a kötés teherbírását. Ezért a 0,14 MPa az optimális hegesztési palaméter a megfelelő szilárdság eléréséhez a tesztelt paraméterek közül.

4. Következtetés

Cikkünkben az összeszorító erőt vizsgáltuk, miközben más tényezőket állandó értéken tartunk. Az eredmények azt mutatják, hogy a legnagyobb szakítóerőt, 380 N-t 0,14 MPa nyomásnál éri el. Nagyobb szorítónyomásnál a szakítóerő csökken, és a szakítóerő legkisebb értéke 303 N, amelyet a legnagyobb, 0,31 MPa szorítónyomásnál érnek el, ezután a kötés megfelelő minősége kérdésessé válik, és a megfelelő kötés minőségének elérése is nehézkes. Ez arra enged következtetni, hogy esetünkben a hegesztési nyomás növelésével a hegesztés minősége romlik egy adott pont felett, így a helyes paraméterválasztás kiemelten fontos a hegesztés során. A helytelen paraméterek könnyen vezethetnek repedésekhez vagy belső károsodáshoz a varratban. A törés helyének elemzése arra utal, hogy a nagyobb szorítónyomás csökkenti a mintadarab teherviselő képességét.

A tanulmányon alapuló jövőbeli megvalósítások az ultrahangos hegesztés folyamatoptimalizálására összpontosíthatnak más paraméterek, például a hegesztési energia, az idő és az amplitúdó tanulmányozásával. További vizsgálatok kiterhetnek a változó anyagvastagságra, a kötés méretére, valamint a változó ultrahangos frekvenciák hatásának vizsgálatára. Ezen kívül a különböző típusú bevonatok és felületkezelések hatásainak vizsgálata értékes információkat nyújthat a kötések vizsgálatára és az anyagok kompatibilitására ultrahangos hegesztés esetén.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Woo J.: *A short History of the development of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*. <http://www.ob-ultrasound.net/curie.html> (letöltve: 2025. április 1.)
- [2] Fujii H. T., Goto Y., Sato Y. S., Kokawa H.: *Microstructure and lap shear strength of the weld interface in ultrasonic welding of Al alloy to stainless steel*. Scripta Materialia, 116. (2016) 135–138. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.02.004>
- [3] Tang M., Zhang P., Yu Z., Shi H., Li S., Wu D., Tian, Y.: *Study on ultrasound welding process of alumi-*

num/copper dissimilar metals. Physics of Metals and Metallography, 121/14. (2020) 1400–1410.

<https://doi.org/10.1134/S0031918X20140173>

- [4] de Leon M., Shin H. S.: *Review of the advances in aluminum and copper ultrasonic welding in electric vehicles and superconductor applications*. Journal of Materials Processing Technology, 307. (2022) 117691. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117691>
- [5] Yin P., Xu C., Pan Q., Zhang W., Jiang X.: *Effect of different ultrasonic power on the properties of RHA steel welded joints*. Materials, 15/3. (2022) 768. <https://doi.org/10.3390/ma15030768>
- [6] Abbas Z., Zhao L., Deng J., Wang S., Hong W.: *Advances in ultrasonic welding of lightweight alloys: A review*. High Temperature Materials and Processes, 42/1. (2023) 20220298. <https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0298>
- [7] Bhudolia S. K., Gohel G., Leong K. F., Islam A.: *Advances in ultrasonic welding of thermoplastic composites: a review*. Materials, 13/6. (2020) 1284. <https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0298>
- [8] Das S., Satpathy M. P., Routara B. C., Nanda B. K., Sahoo S. K.: *Ultrasonic metal welding of Al/Cu joints with Ni coating: parametric effects on joint performance and microstructural modifications*. International Journal of Materials Research, 115/11–12. (2024) 1105–1115. <https://doi.org/10.1515/ijmr-2024-0068>
- [9] Li J., Zillner J., Balle, F.: *In-depth evaluation of ultrasonically welded Al/Cu joint: Plastic deformation, microstructural evolution, and correlation with mechanical properties*. Materials, 16/8. (2023) 3033. <https://doi.org/10.3390/ma16083033>
- [10] Bose S., Chelladurai H. M., Kanaiyaram P.: *An experimental investigation on feasibility of submerged ultrasonic spot welding of thermoplastics*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L. Journal of Materials: Design and Applications, 238/10. (2024) 2043–2057. <https://doi.org/10.1177/14644207241239475>
- [11] Görick D., Welsch J., Gerardo C. D., Kupke M., Cretu E., Rohling R.: *Inline Monitoring of continuous Ultrasonic Welding Processes of Thermoplastic Composites via a custom polyCMUT based Ultrasound Array*. In: 20th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT) 29(6). 2024. NDT.net. <https://doi.org/10.58286/29933>
- [12] Shakil M., Tariq N. H., Ahmad M., Choudhary M. A., Akhter J. I., Babu S. S.: *Effect of ultrasonic welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints*. Materials & Design, 55. (2014) 263–273. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.074>