

# ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA

ANYAGTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK



6. ÉVF.  
2023. 2.

# ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA

Anyagtudományi Közlemények

6. évfolyam, 2023. 2. szám



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET  
Kolozsvár  
2023

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

**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:** Biró Annamária

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

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

**Borítótér / Cover:** Kőnczey Elemér

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

**Copyright** © a szerzők / the authors, EME/ TMS 2023

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

**DOI: 10.33923/amt-2023-02**

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

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

*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

---

BARABÁSSY Miklós .....	64
<i>A Szent Korona süllyesztett rekeszománcai</i>	
<i>The Recessed Apertures of the Holy Crown</i>	
Borhy Levente, Szabéenyi Gábor .....	74
<i>A ragasztóanyag rétegvastagsága hatásának vizsgálata fém és kompozit közötti kötésekben</i>	
<i>Investigation of the Effect of Layer Thickness of Adhesive Material on Metal to Composite Joints</i>	
Dobránszky János .....	80
<i>Egy meghibásodott turbófeltöltő károsodáselemzése</i>	
<i>Failure Analysis of a Damaged Turbocharger</i>	
Egerszegi Boglárka Fanni.....	84
<i>Orvosieszköz-tervezés a kézmozgás támogatására</i>	
<i>Medical Device Design to Support Hand Movement</i>	
Fekete L. Máttyás .....	90
<i>A pozdorjaadalékos beton elemzése</i>	
<i>Analysis of Concrete with Chaff</i>	
Nagy Balázs, Kovács Tünde Anna .....	95
<i>A maximális hézag meghatározása lézeres hegesztéshez</i>	
<i>Determination of maximal gap for laser welding</i>	
Szovák Benedek, Maróti János Endre, Orbulov Imre Norbert .....	100
<i>Részecskeerősítésű nyílt cellás fémhabok</i>	
<i>Particle Reinforced, Open Cell Metal Foams</i>	

Tamás-Bényei Péter .....	105
<i>A sós víz hatása a bazaltszál erősítésű kompozit tulajdonságaira</i>	
<i>The Effect of Salt Water on the Properties of Basalt Fibre Reinforced Composites</i>	
Tóth László.....	114
<i>Szerszámacélok tulajdonságainak változása a hőkezelés hatására</i>	
<i>Effect of Heat Treatment on the Properties of Tool Steel</i>	
Vincze Kata Dóra.....	121
<i>Ortopédiai ortézis károsodási folyamatainak vizsgálata</i>	
<i>Examination of damage Processes of Orthopaedic Orthosis</i>	



## A Szent Korona sülyesztett rekeszszománcai

### The Recessed Apertures of the Holy Crown

Barabássy Miklós

KEMPELEN Tudósakadémia Alapítvány, <https://barabassymiklos.academia.edu>, Budapest, Magyarország,  
[miklos.barabassy@gmail.com](mailto:miklos.barabassy@gmail.com)

#### Abstract

One of the most important questions in the study of the Holy Crown concerns the technique of making the enamel cloisonné. The importance of this is that the manufacture of cloisonné enamel reached its peak in the 10th and 11th centuries in Byzantium and Western Europe. The figural enamels of the Holy Crown are all images of top-quality products of this process. Archaeometric analysis of the Holy Crown has not been carried out. My work attempts to fill this gap. The knowledge of the techniques used will help to determine the place and time of the various parts. For the time being, the aim is to recognise the techniques only from the colour side, but if possible from both sides. With this tutorial I would like to describe what I have learned so far.

**Keywords:** *Holy Crown, diaphragm making, archaeometry.*

#### Összefoglalás

A Szent Korona kutatásának egyik legfontosabb kérdése a sülyesztett rekeszszománc előállításának technikájával kapcsolatos. Ennek jelentőségét az adja, hogy a rekeszszománc készítése a 10–11. században érte el a csúcspontját mind Bizáncban, mind Nyugat-Európában. A Szent Korona figurális zománcképei minden képen ennek az eljárásnak a csúcsmínőségű termékei. A Szent Korona archeometriai vizsgálata sem az MTA-n belül, sem azon kívül nem történt meg. Munkássággal ezt a hiányt próbálom pótolni. Az alkalmazott technikák megismerése hozzásegít a különböző részek készítési helyének és idejének a meghatározásához. Egyelőre a cél a technikák felismerése csak a színoldalról, de ha lehetőség van rá, akkor mindkét oldalról. A tanulmányt ismertetni szeretném, hogy mire jutottam eddig.

**Kulcsszavak:** *Szent Korona, rekeszszománc-készítés, archeometria.*

## 1. A rekeszszománc (émail cloisonné) technikai fejlődése

Maga a rekeszszománc – francia nevén: émail cloisonné – a zománc anyaga, üveg. Tehát nem kristályos szerkezetű, mint a kerámiák, hanem amorf. A zománckép készítésekor a különböző színű üvegport egy fémfalakkal határolt mélyedésbe – ez a recipiens – több rétegben olvasztva töltik ki. A kép különböző színű részeit a rekesz-falak választják el egymástól.

A tanulmány kizárólag olyan aranyrecipiens-sel foglalkozik, amely sülyesztett szendvicses technikával készült, és amelyet mind Bizáncban, mind Nyugat-Európában a 10–11. század közepé-

ig alkalmaztak. A Szent Koronán található összes (19 db) figurális zománckép ezzel a technikával készült. Azért szendvicses szerkezetű a recipiens, mert tipikusan két rétegben egymásra forrasztott lemezből készültek, és az alsó lemez gyakran le is van sülyesztve.

### 1.1. A telizománc

Meghatározás szerint a telizománc a lemez teljes felületét kitölti. Ennek elérése érdekében a lemez szélét felhajtották, illetve más megoldás szerint egy vastagabb aljlemez körbekeretettek. Erre azért volt szükség, hogy a megolvasztott üveg ne folyjon a szélén túl; ezt lehet megfigyelni az **1. ábrán**.



1. **ábra.** Telizománc kép a Martvili-triptichon főpánéljén, Tbiliszi



2. **ábra.** Krisztus-zománckép medálon, Cleveland

### 1.2. Kivágással készült, szendvicses szerkezetű recipiens

Ebben az esetben két lemezt forrasztottak egymásra. A felsőből ott, ahol a zománc látható, kivágtak egy darabot, majd egymásra forrasztották. Így a recipiens mélysége a felső lemez vastagságával egyenlő. Ez a recipienskészítési mód magától értetődően alakult ki a 2. **ábrán** bemutatott megoldásból. Ha két lemez összeforrasztásával jön létre a recipiens, azt szendvicstechnikának nevezem.

### 1.3. Szendvicstechnika súllyesztéssel kombinálva

Véleményem szerint korán rájöttek arra, hogy a zománcképek készítése esetében nagy mennyiségű aranyat tudnak megspórolni, ha a recipiens szükséges mélységét nem egy vastag és egy vékonyabb lemezzel érik el, hanem a két vékony lemez közül az alsót le is súllyesztik.

Ezt az eljárást alkalmazták a Szent Korona összes figurális képe esetében, függetlenül attól, hogy hol készültek: Nyugat-Európában vagy Bizáncban. A jelen tanulmány ezt a típusú technikai kivitelezést helyezi középpontba. A cél az, hogy olyan szempontokat fogalmazzunk meg, melyek segítségével felismerhető, csak a színoldaról, a recipiens kiképzésének módja. A létrehozott recipiens meghatározásával fontos információkhoz juthatunk a Szent Korona készítési korának és helyének a meghatározását illetően. Mégis, az időrendi használat indokolja, hogy e technika mellett bemutassam a korábbi (telizománc) és az ezután következő korok gyakorlatát, a limogesi és a „csak” súllyesztési technikákat.



3. **ábra.** 11. századi medál, Metropolitan Museum of Art (MET) (színoldal-bal; hátlap-jobb)



4. **ábra.** Krisztus-kép; súllyesztett szendvicses recipiens, British Museum, London



5. **ábra.** Bizánci Krisztus, zománckép kb. 1100-ból, Metropolitan Museum of Art (MET)

#### 1.4. Süllyesztett recipiensek

A 10-11. század fordulóján fogytán volt az arany mind Nyugaton, mind Bizáncban. Bizáncban a 11. század második harmadától a recipienseket nem szendvicstechnikával készítették el, hanem egyszerűen süllyesztették a vékony aranylemezt. Az általam ismert legkorábbi ilyen technikával készült rekeszománc a Monomachos-koronának nevezett műtárgy (1045–1050) a Magyar Nemzeti Múzeumból (MNM).

Az egyik oka annak, hogy ezt a műtárgyat technikai szempontból hamisítványnak titulálta Nikolas Oikonomides, pontosan az egyszerű, süllyesztési technika volt [1]. A későbbiekben azonosítottak további, hasonló technikával készült zománcképeket, amint azt az 5. ábra is mutatja (1100 körül). Ebben az időben Bizáncban már elsősorban az opálos (nem fényáteresztő, a csiszolt márványhoz hasonló) zománctot használták. A másik feltűnő jellegzetesség: a sűrűbb rekeszfalak.

#### 1.5. Limoges vagy champlevé zománccok

A 11. század közepétől a 12. század második feléig nemigen készült arany rekeszománckép. Ennek oka az lehetett részben, hogy megváltozott a divat, másrészt a Német-római Birodalomban (1000-tól hosszú ideig nem vertek aranyérmét), míg Bizáncban (itt elsősorban a hadakozások miatt) szélsőségesen megcsappant az aranykészlet. A 12. században Nyugaton az aranyzománccokat kiszorították az ún. champlevé zománccok. Ez esetben a réz- vagy bronz- (néha ezüst- és nagyon ritkán arany-) lemezekben vésésekkel mélyedéseket, „gödöröket” hoztak létre. Fontos, hogy a zománc, amit alkalmaztak, fényelnyelő, opálos volt, ezért nem csillogott úgy, mint a korábbi rekeszománccok (németül: Grubenschmelz; innen a „gödörzománc” kifejezés).

#### 2. A szendvicstes süllyesztett rekeszománc recipiensének technikája

A 10. századtól a kapcsolat Bizánc és a Német-római Császárság között nagyon megerősödött. Kö-

szönhető ez Theophanu hercegnőnek, aki 972. április 14-én érkezett Itáliába I. (Nagy) Ottó igyekezetének következtében, aki mindent elkövetett annak érdekében, hogy újra létrejöjjön a Római Birodalom. Bizánc azonban magát tartotta a Római Birodalom örökösének, valósággal lenézte a Frank Birodalmat. Ottó igyekezetének végül is az lett az eredménye, hogy II. Ottónak Bizáncból hoztak egy dűsgazdag, magas rangú hercegnőt, de mégsem a szűk császári családból. Theophanu hatalmas udvarral és hozománnyal érkezett, ezért feleségül adták II. Ottóhoz. Ettől kezdve számtalan dokumentum maradt fent, amely az erős bizánci hatást igazolja: kétnyelvű énekeskönyv, kódexek, ruházatok, szőnyegek, textíliák, és nem utolsósorban, ami számunkra fontos, a szigorú vallásos keresztény műtárgyakhoz, relikviákhoz tartozó vagy szenteket ábrázoló, bizánci típusú rekeszománccok. 983-ban, II. Ottó halála után Theophanu a hatalma csúcsára jutott, mint a Német-római Birodalom régense. Ebben az időben keletkezett számtalan műtárgyon keveredik a görög nyelv és stílus a latinnal.

Az első általam ismert és keltezett, süllyesztett szendvicstes technikával létrehozott bizánci zománc, a Preslav-kincs darabjai a 920–970 közötti korból származnak. A Mainzban helyreállított kincset Antje Bosselmann-Ruickbie ismertette [2]. A kétrétegű recipiens alsó lemeze kb. 0,1 mm és tisztább arany, míg a felső, amelyből a kontúrt kivágták, 0,2–0,3 mm vastagságú. Az alsó lemezt trébeléssel mélyítették. Valószínű, hogy a zománcművészetben a süllyesztett szendvicstes technikát először Bizáncban kezdték használni. Nyugat-Európában ezzel a technikával készült zománctot a 10. század első feléből nem ismerem.



6. ábra. Thomas Becket halála, limoges zománc, 1180 körül. V&A, foto: Marie-Lan Nguyen



7. ábra. Zománckép a Preslav-kincsen, Bolgár Nemzeti Múzeum



A fentiekből látható, hogy a zománckészítés egy többfázisú eljárás, ezért meg kell vizsgálni a megoldások kialakulásának folyamatát, előnyeit és használatának idejét is. Theophanu idejében megszaporodtak a zománcképek Nyugat-Európában, az Alpoktól északra. Az ebben az időben létrehozott zománcképek két stílus szerint készültek.

Az egyik a korábban is ismert telizománc-technikával, a másik a sülyesztett szendvicses technikával. Ebben a korban elterjedtebbek voltak a sülyesztett szendvicses technikával készült rekeszománccok. Ez igazolhatóan használatban volt az Egbert által működtetett művészeti műhelyekben is.

Mivel a Szent Korona összes figurális zománcképe sülyesztett szendvicses technikával készült, ennek leírása alapos felkészülést igényel. A Szent Koronán is keveredik a latin és a bizánci nyelv, ami a 10. század végi és 11. század eleji műtárgyakon, a szász Liudolfingerek korában gyakrabban fordult elő, sőt, jellegzetesnek nevezhető az Ottó-kori ötvöstműveken, olyannyira, hogy egészen a múlt század végéig sok nyugat-európai díszítő zománcclemezről hitték azt, hogy azok bizánci eredetűek.

Az Ottó-kori vegyes, bizánci és keleti frank emlékek közül kiemelkedik II. Henrik perikópa (bibliai részlet) imakönyve és a Morgengabe-kereszt, de föltétlenül meg kell említenünk a Szent Mar-



8. ábra. II. Henrik perikópa imakönyvének részlete (München)



9. ábra. II. Henrik imakönyve, Morgengabe-kereszt részlete, P. Schramm után

sus-relikviát, az esseni kincstár legkiemelkedőbb darabját, amit sajnos a szekularizáció idején megsemmisítettek.

Az természettudományi biztonsággal igazolható, hogy a Szent Koronán az abroncsgyűrűt a keresztpánthoz igazították, és a pártát, a csüngőket és még további részeket már a keresztpánt szerint szerelték az abroncsgyűrűre. Az is valószínűsíthető, hogy az egységes keresztpántot az Egbert-műhelyben készítették. Következésképpen, ha bebizonyosodik, hogy az abroncsgyűrűn lévő hat, biztosan eredeti zománckép 10. századi, akkor annak, hogy a 10. század végén közel azonos időben létrehozott nyugati és keleti zománccok egyazon műtárgyon szerepeljenek, a legnagyobb esélye pontosan az ottói birodalomban volt lehetséges. Bár átnéztem kb. 2000 zománcképet, relikviát és egyéb műtárgyakat Bizánctól és attól nyugatra, de olyan, biztosan 1000 körül készült műtárgyat, amelyen a szóban forgó két földrajzi terület zománcképei egyszerre szerepeltek volna, máshol, mint a Német-római Birodalomban, nem találtam. Ezt a tényt erősíti a pántszelességek azonosága és a két azonos méretű és megjelenésű Pantokrátor-kép is.

A zománcképek korának meghatározása érdekében fontos lehet a használt anyagok és technológia megismerése. Ezért itt most azt a célt tűztük ki, hogy megvizsgáljuk, lehetséges-e egyáltalán a recipiensek ezen készítési technikáját felismerni a képek színoldaláról (előlapja felől).

A sülyesztett szendvicses zománcképek felismerése nem mindig egyszerű, itt tudniillik két különböző recipienskészítési technika együttes használatáról van szó. Az egyik a szendvicses (1.2-es alfejezet), a másik a trébeléses sülyesztési (1.4-es alfejezet) eljárás. Ahhoz, hogy jól megértsük ezt az összetett technikát, előbb külön-külön tárgyaljuk őket.

## 2.1. A szendvicses recipiens

A tisztán szendvicses recipiens, amely ugye két, egymásra forrasztott lapból áll, felismerése gyakran lehetetlen. Esetenként nem lehet megkülönböztetni a véséstől. A kérdés az, hogy miről lehet felismerni, hogy a 3. ábrán látható medál bizony nem véséssel készült? Ezúttal segítségünkre van az, hogy a fej bal oldalán, felül, megsérült a lemez (10. és 11. ábra). Ez esetben a színoldalról való felismeréshez segít egy sérülés a zománccozás szélén. A sérüléskor kifordult a recipiens széle, és jól be lehet látni a recipiens aljába. Az, hogy kifordult, azt bizonyítja, hogy az alsó lemez sokkal vékonyabb, mint a felső lemez. Ezt igazolja a



10. ábra. Részlet a 3. ábráról



11. ábra. Részlet a 3. ábráról

hátoldali képen is látható sérülés. A felismeréshez jó minőségű képekre van szükség, de még így is nehézkes. Ajánlatos a lemez élét is alaposan megvizsgálni. Ez esetben szükség van vagy egy nagy felbontású, 3D-s, digitális modellre, vagy egy sztereó mikroszkópra. A Szent Korona esetében, mivel a korona nem vizsgálható, ezért elengedhetetlen a 3D-s, számítógépes feldolgozható modell készítése.

A 10–11. században nem túl gyakran, de használták a szendvicstes recipienst. Az tény, hogy a 20. század végéig túl kevés ismeretünk volt az alkalmazott recipiensfajták terén, illetve ezek felismeréséhez is. Magyarországon D. Buckton hívta fel először a figyelmet a recipiensváltozatokra, amikor a „latin koronát” vizsgálta [3]. A 12. századtól, amikor a cloisonné zománcokat felváltotta a champlevé zománc, akkor a rézlemezbe a mélyedéseket már vésték, sőt stilisztikai szempontból szükséges volt a vésetek mélységének változása is. Az arany rekeszszománc recipiensének mélysége állandó. Egy másik szempont az, hogy véséssel változó méretű forgács keletkezik, aminek a vesztesége nagyobb, mint a kivágáskor, ami fontos szempont az arany esetében. Így könnyen érthető az, hogy a cloisonné zománcok esetében a szendvicstechnikát preferálták a véséssel szemben. Ennek mentén meggondolandó a Reichskrone zománcclemezeinek is az újabb,

alaposabb átvizsgálása, mert egyelőre úgy tartják számon, hogy véséssel készült [4].

Összefoglalva: a felső lemez vastag, a kivágott kontúr élei épek, sarkosak és határozottak. A hátoldalon az alsó lemez nem teljesen sima. Ez a hevítés miatt gyakran jelentkezik.

## 2.2. A sülllesztett szendvicstes recipiens

A szendvicstes technika felismerése sokkal egyszerűbb, ha ismert a zománcclemez hátoldala is. Figyeljük meg a 4. ábrát. Ami rögtön feltűnik, az a betűk mélyedései. Ezek a hátoldalon nem látszanak, míg ahol a Krisztus-zománckép látszik, a hátoldalon is látszik a mélyítés. Tehát a felismerés hasonló esetekben, amikor az elő- és hátoldalt is vizsgálhatjuk, nem ütközik különös nehézségbe. Ennek a tanulmánynak az a célja, hogy olyan jellegzetességeket határozzunk meg, amelyekkel az eljárást a zománckép színéről (előoldala felől) is megállapíthatjuk.

Mielőtt a konkrét példákon bemutatom a különböző műhelyekben alkalmazott eljárásokat, fel kell mérni a lehetőségeket. Mérnöki szempontból nézve a lehetséges technológiai sorrend a következő:

1. Egy vékony lemezre, a felsőre, rárajzolják a zománckép kontúrját. Ezt azután kivágják.

A folytatásban két lehetőség adódik:

a) Előbb a két lemez összeforrasztása, és azután a sülllesztés.

– 2a) Az alsó lemezt és a felső lemezt összeforrasztják.

– 3a) Az alsó lemezt ott, ahol a felső lemez ki van vágva, lesülllesztik. Ennek az eljárásnak a velejárója az, hogy a sülllesztés gyakran néhány tizedmilliméterrel a kivágott kontúrban belül fog elhelyezkedni.

– 4a) Ezután helyezik a rekeszfalakat a mélyedésbe, majd beforrasztják.

– 5a) A zománcozás következik több lépésben.

b) Előbb a sülllesztés és azután az összeforrasztás.

– 2b) Az alsó lemezre is rárajzolják a kontúr.

– 3b) A rajzolt kontúr lesülllesztik. Ez a sülllesztés, mivel a sülllesztés oldala a mélyedés felé általában kissé rézsű, ezért legtöbbször az így keletkezett sülllesztés felső pereme nagyobb, mint a felső lemez kivágása. Ez gyakran szándékos lehetett.

– 4b) Az alsó részbe behelyezik a rekeszfalakat, és egyszerre történik a forrasztás a felső lemezzel. Ez esetben gyakran szándékosan a rekeszfal a felső lemez alá kerül, sőt gyakran a felső lemez éle alá, vele egy irányban is ve-

zetnek rekeszfalat. Így a rekeszfal érintkezhet a kép szélével.

- 4c) Az előbbi megoldás egyik alternatívája, hogy a forrasztást nem egyszerre végzik, hanem egymás után. Ez történhet úgy, hogy előbb beforrasztják a rekeszfalakat és azután a felső lemezt. Az eredmény, mint fentebb, tehát ez esetben is az, hogy kerülhet a rekeszfal a felső lemez alá. De lehetséges az is, hogy előbb a két lemezt összeforrasztják és utána benyomják a rekeszfalakat a felső lemez alá.

Mielőtt továbbmegyünk, előbb vizsgáljuk meg a **4. ábrát**. A szóban forgó technika legjellegzetesebb ismertetőjelei:

- 1. a relatíve kis aranyfogyasztás,
- 2. a recipiens sarkos, ami a lemez színén, az arany és az üveg találkozásánál pontos átmenetet képez.
- 3. a „b”, illetve „c” verziók záródása a sarkoknál előnyös, ezért ezek a lemezek sokkal kevésbé érzékenyek a kontúroknál.

A sülyesztett szendvicses eljárás legegyszerűbb technológiai folyamata az, ha a felső lemez kivágása után közvetlenül forrasztják, és azután sülyesztik. Vagyis a fenti „a” eljárás szerint képezik ki a recipienst.

A sülyesztett szendvicses eljárás egy egyértelmű folyamat eredménye, ami a telizománccal kezdődött, majd a szendvics technikával folytatódott, és a sülyesztett szendvicses recipiennel jutott el a zománcképkészítés legmagasabb fokára. Véleményem szerint Bizáncból indult, és átvették az Egbert-műhely gyakorlatába is. Most figyeljük meg még egyszer a **4. ábrát**. Ami feltűnik, az a Krisztus nimbusza, és azon belül is a nimbuszhoz tartozó kereszt. A két vízszintes keresztzsár a felső lemezhez tartozik, a függőleges szár azonban külön áll, elvált a felső lemeztől.

Ha tehát megvizsgáljuk hátulról is a lemezt, akkor látható, hogy a Krisztus nimbusza teljes egészében le van sülyesztve, ott is, ahol a keresztirányú keresztzsárak állnak.

Ez azt jelenti, hogy azelőtt sülyesztettek, mielőtt a két lemezt összeforrasztották volna. Ez az eljárás több lehetőséget rejt. Ha a sülyesztés a két lemez összeforrasztása előtt megtörténik, akkor lehetséges a sülyesztés kiterjesztése a kontúrón túl is. A **13. ábrán** (a medál hátoldala) látható, hogy a szendvics kialakítása úgy történt, hogy az alsó lemez mérete kisebb, mint a színén lévő. Ez is előfordul, így még kevesebb aranyra van szükség. A lényeg azonban az, hogy Péter jobb keze sokkal kecsesebb, mint ahogy az a hátoldalon látszik.

Ebből következik, hogy tudatosan bővebb süly-

lyesztést alkalmaztak, mint amekkora látható a zománcozott képen. De további különleges megoldások is lehetővé váltak, és pedig a rekeszfalak akadály nélkül elérhették a kivágott kontúr szélét, sőt szándékosan alá is nyomhatták. A betűk kialakítása esetében, mint amilyen az O, P, A stb. betűk, szükség volt a kiesett rész pótlására, amelyeket, amikor a rekeszfalakat forrasztották, ezeket is behelyezték. A betűk esetében általában nem sülyesztettek, de nem sülyesztettek gyakran a botok, keresztzsárak, lándzsa stb., a figurán kívül eső jelképek esetében sem. Ezekben az esetekben a zománcreteg vastagsága kicsi, ezért gyakran ki is hullott ott a zománc, amint az a **13. ábrán** is látható.

A **12. ábrán** a trier-esseni műhelyből bemutatott néhány példát, amivel ezt az eljárást igazolni lehet. A figyelemre méltó különlegességeket nyilakkal mutatom. Az összes bemutatott példa a trier-esseni műhelyből származik, és mindannyian 1000 előttiak.

#### 4. A szendvicstechnika felismerése a színoldalról

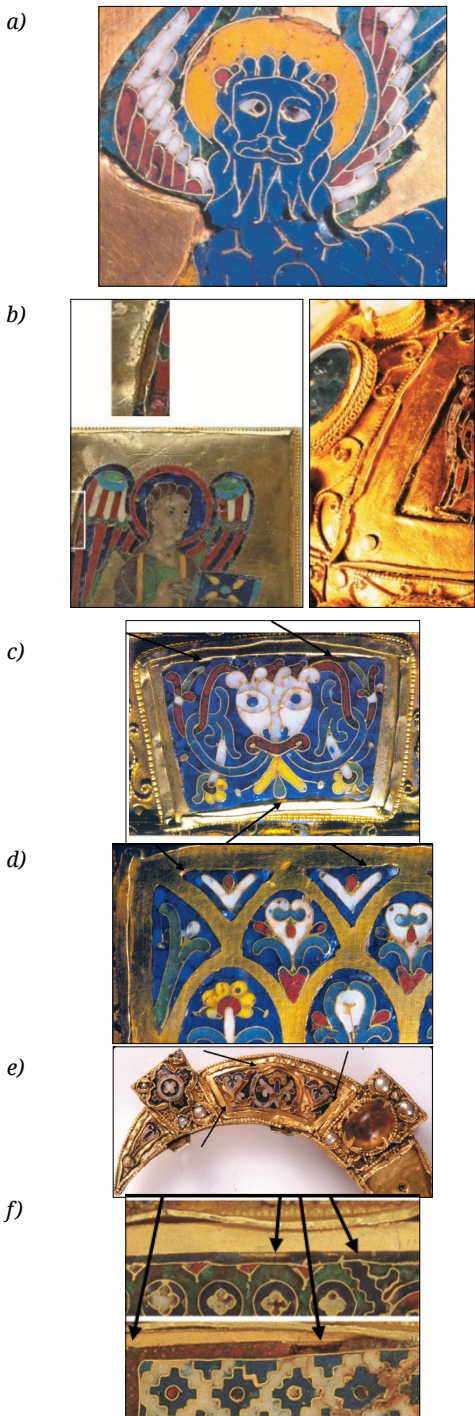
Egy vékony lemezen a szendvicstechnikától eltérő mélyedés létrehozásának módja az, ha abban trébeléssel (domborítással) sülyesztést hoznak létre (**14. ábra**). A trébeléssel történő sülyesztés velejárója, hogy a lemez a képlékeny alakváltozás helyén keményedik, és a keletkezett, közel függőleges mélyítési fal alátámasztja a lemez azon részét, amit nem sülyesztettek. Ezért, ha később a zománckép oldaláról nyomtatják, mint egy díszkönyvborítón, akkor a kontúr kihangsúlyozódik. A kialakuló jellegzetességek a színoldalról (az előlap felől) az egyszerű sülyesztés esetében a következők.

1. A kontúr éle, ami a színoldalról látszik, lekerített, és teljes hosszában sima és tompa. Ez elkerülhetetlen, de főleg a vékony aranylemezek esetében nagy figyelmet érdemel. Feltételezhető, hogy az igényesebb zománcképeknél pontosan ez volt az ok, amiért éppen a sokkal összetettebb szendvicsszerkezetes megoldást választották. Hiszen ez utóbbi esetében a zománc és az arany között az átmenet sokkal tökéletesebb.

2. Ha ezt a zománcclemez a színe felől nyomás érte, akkor, mint a **14. ábrán** látható kép esetében is, egy éles hajlat látszik a színoldaláról.

Színoldali jellegzetességek a sülyesztett szendvicse-zománcclemezek esetében:

1. A felső lemezt ki kellett vágni ott, ahova a zománc került. A vágás nagyobb nagyítás esetében



**12. ábra.** a) Nagy sülyesztett rekeszománkos kép, Essen; b) Péterbot, Limburg; c) Egbert-ereklye, Trier; d) Keresztsgöz relikvia, Essen; e) Theophanu-kereszt, Essen; f) Krisztus nimbusz, Essen; g) Apostolképek a Szent Koronáról



**13. ábra.** Szent Péter-zománckép, MET



**14. ábra.** Szent Miklós-zománckép, MET

jól elkülöníthető a lekerekített éltől. Az él sarkos. A vágás általában egy éles szerszámmal történt, és nem forgácsolással.

2. Ebben az esetben a vágási élben marad sorja, olyan anyag, amit az utólagos csiszolással gyakran rákennek a zománc felületére, lásd **15. ábra** c. és e. képek.

3. A betűk kivágása – a méretük miatt és mert nincs erre kialakított szerszámuk, ezért azok kontúrja – meglehetősen szabálytalan, lásd **15. ábra** b. kép.

4. Ha a felső lemez vágáskor megsérül, akkor ott a recipiens megnagyobbodik, lásd **15. ábra** k. kép.

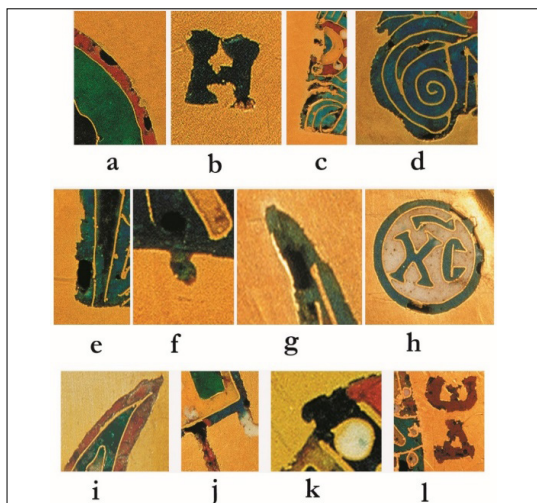
5. Abban az esetben, ha a zománc és gyakran a rekeszfal is bemegy a felső lemez alá, akkor a forrasztásnál a felső lemez és a rekeszfal szintén összeforrhat; megvastagodásokat és olyan különleges formákat hoz létre, amik csak a sülyesztett szendvicses szerkezetre jellemzők, lásd **16. ábra** h. és **17. ábra** h. kép vagy a **4. ábra**.

6. A rekeszfal nem mehet be a felső lemez alá abban az esetben, ha a sülyesztést a két lemez összeforrasztása után végezték. Ezért ezt a technikát csak abban az esetben tudjuk felismerni, ha a zománc az amúgy is vékony széleken kihullott. Ez esetben feltűnő, hogy a felső lemez vastagsága

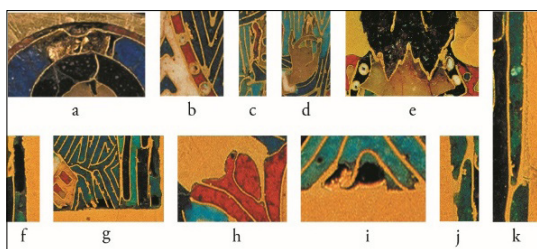
alatt láthatóvá válik az alsó lemez kezdődő süllyesztése, lásd **12. ábra** a–g. képek.

7. Gyakran előfordul, hogy a felső lemez megsérül, és hámlás jelentkezik, lásd **15. ábra** c; f; g; i; j részletek.

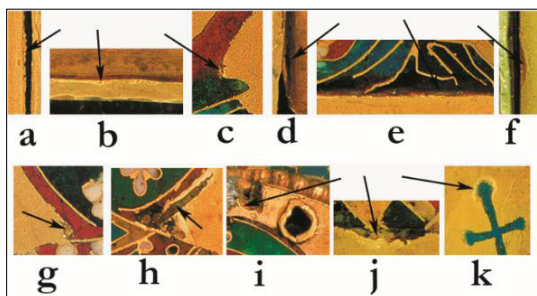
8. Érdekes, hogy a süllyesztéses szendvicstechnikát már a 20. század utolsó harmadától szinte minden zománcczakértő felismerte, de sajnos Magyarországon nem akarnak tudomást venni



**15. ábra.** A szendvicstechnika felismerése a Szent Korona zománcképeinek színoldaláról



**16. ábra.** A szendvicstechnika felismerése a Szent Korona zománcképeinek színoldaláról



**17. ábra.** A szendvicstechnika felismerése a Szent Korona zománcképeinek színoldaláról

róla. Megfigyelésem szerint a bizánci zománcműhelyekben volt jellegzetes az a technika, ahol előbb süllyesztettek, és utána forrasztották össze a lemezeket. Ugyanezt érzékelem a Szent Korona alsó részén is. Példaképpen a velencei Bibliotheca Marciana könyvfedél bizánci zománcképeiből mutatok be néhányat (**18. ábra**).

A korábban leírt jellegzetességek jól felismerhetők a 10. századi bizánci zománcképeken is. Ezeket nyilakkal jelöltem.

A San Marco-székesegyházban található zománcképek esetében feltűnik, hogy a zománckép színén nagyon sok helyen el van kenődve a zománccsal. Jellegzetesen ez akkor nagyon feltűnő, ha a zománckép hibák, légbuborékok maradtak.

9. A szendvicstechnika felismerése, ha ismert a zománckép mindkét oldala.



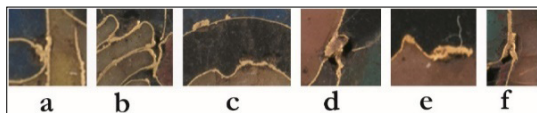
**18. ábra.** A szendvicstechnika felismerése a színoldalról, Bibliotheca Marciana, Velence

A sülylesztés felismerése a színoldalról nem mindig lehetséges. Ha a zománc ép és a széle is takart, akkor a színoldalról a szendvicstechnika felismerhető, viszont a sülylesztésre csak közvetett jelekből lehet következtetni. Ilyen jel lehet például a betűk szélének felismerése. Tudniillik a lágy és vékony lemezre jellemző a betűk szélének egyenetlensége. A vastag lemez általában jobb széleket biztosít. A hátoldali jellegzetességek: nem minden színoldali zománcelem helye jelenik meg a hátoldalon kidudorodva. Itt gondoljunk a betűkre vagy olyan részekre, amelyek a testen kívül esnek, mint a bot, kereszt, lándzsa stb.

Ajánlatos a számítógépet is segítségül hívni. Készítünk egy-egy fényképet a szín- és a hátoldaláról is. A számítógépben elkészítjük hátoldalnak a függőleges tükröképét, és egymásra helyezük a színoldali és a tükrözött képet. A szélek szerint pont egymásra igazítjuk. Ha a hátsó, sülylesztett kontúr nagyobb, mint a zománcozott felület, akkor ez nyilván szendvicstechnikát jelent, és pedíg azt, amit fentebb a görög zománctechnikában tapasztaltam, ráadásul ez a jobb minőség. Ha a sülylesztett kontúr mindenhol kisebb vagy egyenlő a zománc méretével, akkor előbb a színoldalról meg kell győződni arról, hogy a fentebb felsorolt tulajdonságok szerint a szendvics- vagy az 1.4 alatt tárgyalt sülylesztéses eljárással van dolgunk. Ha igazolt a felső lemez vágott kontúrja, akkor ez valószínűleg a 3.2a) technika szerint készült, vagyis előbb létrehozták a szendvics lemezpárt, és utána sülylesztették.

10. A sülylesztéses szendvicstechnika összefoglalója

A technika legtöbbször jól felismerhető a zománckép színoldaláról. Ezt a technikát az első ezredforduló körül használták Nyugat-Európában és Bizánban is, az arany recipiensek esetében. Különbség mutatkozik az Alpoktól északra és a Bizánban alkalmazott eljárások között, így fontos támpont lehet a zománckép készítésének helyére és idejére. Tehát a Szent Koronán lévő zománcképeket nem készíthették máskor, mint ebben az idősávban. E kor után az Alpoktól északra megszűnt az aranyzománc-készítés, míg Bizánban visszatértek a telizománchoz, illetve az egyszerű sülylesztést alkalmazták, és az opálos üveg használatára tértek át. A két lemez összeforrasztása másképpen nem jöhetett létre, mint az évszázadok alatt feledésbe merült, ún. reakciós forrasztással, ami lehetőséget adott a többlépcsős, ismételt forrasztásra. Így kizárható, hogy a korona figurális zománcképei egy későbbi hamisításból származhattak volna.



19. ábra. A technika felismerése a színoldalról: Szent György és Szent Kozma, San Marco, Venece

### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] N. Oikonomides: *La couronne dite de Constantin Monomaque*, in *Travaux et Mémoires*. Centre de Recherche d' Histoire et Civilisation de Byzance, 12, 1994, 241–262.
- [2] A. Bosselmann-Ruichbie: *Byzantinischer Schmuck des 9. bis frühen 13. Jahrhunderts*. Reichert, Wiesbaden, 2011, 88.
- [3] Buckton David: *Vorläufige Ergebnisse einer optischen Untersuchung des Emails der Krone*. In Ferenc Fülep – Éva Kovács – Lovag Zsuzsa: *Insignia Regni Hungarie. Studien zur Machtsymbolik des mittelalterlichen Ungarn*. MNM, Budapest, 1983. 129–144.
- [4] S. E. Eckenfels-Kunst: *Goldemails*. Pro Business, Berlin, 2008, 135.



# A ragasztóanyag rétegvastagsága hatásának vizsgálata fém és kompozit közötti kötésekben

## Investigation of the Effect of Layer Thickness of Adhesive Material on Metal to Composite Joints

Borhy Levente,<sup>1,a</sup> Szebényi Gábor<sup>1,2,b</sup>

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

<sup>2</sup> MTA-BME Lendület Könnyűszerkezetes Polimer Kompozitok Kutatócsoport, Budapest, Magyarország

<sup>a</sup> [borhy.levente@edu.bme.hu](mailto:borhy.levente@edu.bme.hu)

<sup>b</sup> [szebenyi@pt.bme.hu](mailto:szebenyi@pt.bme.hu)

### Abstract

In this research, fiberglass-reinforced epoxy composite plates and additively manufactured titanium inserts are adhesively bonded. The samples are investigated by tensile and shear bond test methods. After the mechanical tests, topographical evaluations are conducted over the failure surface areas. A 3D profiling method for the inspection of bonded joints has been developed to quantify and compare failure types. It was found that varying the thickness of the adhesive has a significant effect on the load-carrying capacity of the structure under normal direction loading, whereas under shear loading the effect is modest. The research methodology used allows for the qualification and comparison of further bonded structures.

**Keywords:** *adhesive bonding, metal-composite joint, tensile bond test, shear bond test, topographical examination.*

### Összefoglalás

A kutatás során üvegszál-erősítésű, epoxigyanta-mátrixú kompozitlemezek és additívan gyártott titáninserterek között hoztunk létre ragasztott kötési kapcsolatot. A mintákat normális és nyíró irányú kötésvizsgálatoknak vetettük alá. A mechanikai tesztek követően a minták töretfelületeit topográfiai mérőgép segítségével vizsgáltuk. Ragasztott kötések 3D profilmérőgéppel való vizsgálati módszerét dolgoztuk ki, amellyel számszerűen jellemezhetővé és összehasonlíthatóvá váltak a tönkremeneteli típusok. Megállapítottuk, hogy a ragasztóanyag vastagságának változtatása jelentősen befolyásolja a szerkezet teherbírását normális irányú terhelés esetében, ezzel szemben nyíró terhelésnél a hatás kismértékű. A felhasznált kutatási módszertan segítségével további ragasztott szerkezetek minősítése és összehasonlítása lehetséges.

**Kulcsszavak:** *ragasztás, fém és kompozit kötése, kötésvizsgálat, topográfiai vizsgálat.*

## 1. Bevezetés

A ragasztóanyagok jelentősége a modern iparban rohamosan növekszik, nem kivétel ez alól a nagy terhelésnek kitett szerkezetek gyártása. Az autó-, építő- és az elektronikai ipar egyaránt előszeretettel alkalmazza a ragasztási eljárásokat az elmúlt években [1].

A szerkezeti ragasztóanyagok használatára akkor kerül sor, amikor a ragasztott szerkezeti anyagok nagy terhelésnek vannak kitéve. Ezek a ragasztóanyagok kifejezetten jól alkalmazhatók összetett szerkezetek kialakításához, köszönhetően az olyan előnyös tulajdonságainak, mint a tervezési rugalmasság, egyszerű gyártás és a kiemelkedő, tömegre fajlagosított teherbírás. Más-

felől viszont, a ragasztott kötések teherviselő képessége korlátozott, és számos paraméter szerepet játszik az ilyen módon gyártott szerkezetek élettartamában [2].

Következésképpen a ragasztással összekötött szerkezetek különböző gyártási paramétereinek, mint például a ragasztóanyag vastagsága hatásának vizsgálatával szükséges foglalkozni.

### 1.1. A ragasztott kötések tönkremeneteli módjai

A ragasztás olyan jelenség, amikor két különböző test összeerősítését hozzuk létre ragasztó segítségével oly módon, hogy a két alkatrész között terhelésátadás történik a kötés tönkremeneteléig. A ragasztóanyag adhéziós kötési folyamat során összeköti a szerkezeti anyagokat (1. ábra) [3].

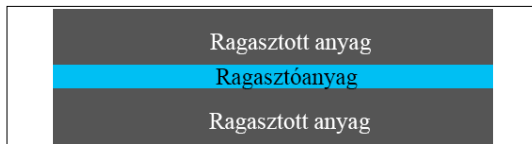
Három különböző típusú tönkremeneteli módot különböztethetünk meg a ragasztással létrehozott szerkezetek vizsgálata során. Adhéziós hiba (2a. ábra) során a tönkremenetel a ragasztóanyag és valamely ragasztott alkatrész közötti elválás miatt következik be. Kohéziós hiba során a tönkremenetel végbemehet a ragasztóanyagban, miközben a ragasztott szerkezet mindkét felén megmarad a ragasztóanyag (2b. ábra), vagy valamely ragasztott anyagban (2c. ábra) [4, 5]. Sok esetben e hibamódok valamilyen kombinációja jelenik meg a valós tönkremenetek során, így az részben adhéziós és részben kohéziós lesz [6].

### 1.2. Vizsgálati módszer

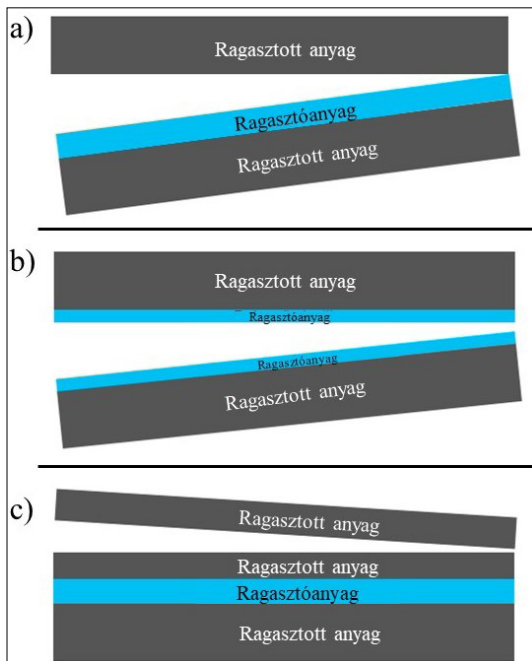
A leggyakrabban alkalmazott módszerek a ragasztott kötések szilárdságának minősítésére az olyan roncsolásos mechanikai vizsgálatok, mint a normális és a nyíró irányú kötésszilárdság-vizsgálat [7]. Ezek a mérési módszerek alkalmasak a ragasztott szerkezetek viselkedésének és teherviselő képességének meghatározására [8, 9].

Az adhéziós kötések minősége nem határozható meg kizárólag roncsolásos vizsgálatokkal, a szerkezet számos tulajdonsága kizárólag topográfiai vizsgálatok során határozható meg. Ennek oka, hogy számos esetben a kohéziós és adhéziós tönkremeneteli típusok valamely kombinációja valósul meg, és ezek arányából lehet következtetni a kötés és a teljes struktúra minőségére [10, 11].

A kutatás során normális irányú és nyíró kötés-terhelési vizsgálatokat végeztünk ragasztóanyaggal kötött, többféle anyagú hibrid szerkezeteken, majd a töretfelületeket felületi topográfiai leképezésnek vetettük alá. A gyártó kizárólag nyírásra terhelte kötés esetében adta meg a ragasztóanyag optimális rétegvastagságát (0,05–0,1 mm), így cé-



1. ábra. Ragasztott kötés sematikus ábrája



2. ábra. Ragasztott kötések tipikus tönkremeneteli módjai: (a) adhéziós tönkremenetel, (b) kohéziós tönkremenetel a ragasztóban, (c) kohéziós tönkremenetel a ragasztott anyagban

lünk ennek megfelelőségét megállapítani normális irányú terhelés esetére is [12].

## 2. Anyagok és módszerek

### 2.1. Anyagok

A kompozitlemezek gyártásához EPIKOTE™ Resin MGS LR 235 és EPIKURE™ MGS LH 235 két-komponensű (100:35), közepes viszkozitású gyan-tarendszert mátrixanyagként, míg erősítőanyagként üvegszál szövetet alkalmaztunk.

20 µm-es szemcseméretű EOS Titanium Ti64 (Ti6Al4V) anyagot használtunk a titáninzertek gyártása során.

A két, imént említett anyag közötti ragasztott kötések létrehozása során a Huntsman Ltd. által gyártott Araldite™ 2011, kétkomponensű (100:80) epoxi ragasztórendszert használtuk.



## 2.2. A próbatetek elkészítése

### 2.2.1. A kompozitlemezek létrehozása

A kutatás során felhasznált kompozitlemezeket vákuuminfúziós módszerrel gyártottuk le. Minden esetben 4 darab egymásra helyezett, üvegszál-erősítésű szövetet [0,90] szövetiránnyal használtunk fel a lemez elkészítése során. Nagy figyelmet fordítottunk a megfelelő felületi minőségre és az egyenletes tulajdonságokra a lemez minden pontjában a későbbi mérések megismételhetősége érdekében. A lemezt a térhálósodást követően leszéleztük, majd 80×80 mm méretű, négyzet alakú lemezdarabokat vágunk belőle.

### 2.2.2. A titáninzertek additív gyártása

A titáninzertek additív gyártással, SLM (selective laser melting) módszerrel készültek. EOS M100 3D típusú, lézeres porágyolvasztási eljárással működő berendezéssel készített, 6 darab titáninzertet használtunk a kutatás során, melyeket azonos módon gyártottunk, 25 mm átmérőjű kör alakú alapfelülettel és 14 mm magassággal.

### 2.2.3. A ragasztott kötések létrehozása

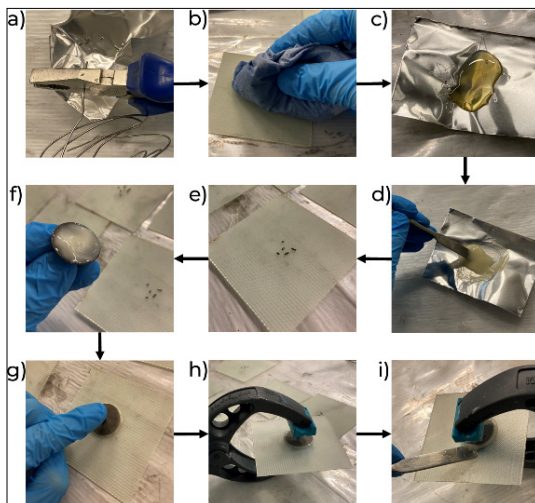
A kompozitlemezek és a titáninzertek közötti ragasztott kötés kialakítása során öt különböző ragasztóréteg-vastagságú mintát hoztunk létre. A ragasztó rétegvastagságának beállításához a kompozitlemezek és a titáninzertek közötti kötés kialakítása előtt a kompozitlemezek felületén meghatározott átmérőjű fémhuzalokat oszlatunk el.

Az első csoportban mint kontrollcsoportban nem használtunk fémhuzalt. Az ezt követő mérések során 0,18 mm, 0,23 mm, 0,43 mm és 1,30 mm átmérőjű fémhuzalokat használtunk, így kialakítva az 5 csoportot.

A mintaalkészítési lépései minden esetben azonosak voltak (3. ábra). Minden egyes mintát legalább 24 órán keresztül szobahőmérsékleten hagytuk térhálósodni.

## 2.3. Mérési módszerek

Az elkészített mintákon mechanikai és makroszerkezeti vizsgálatokat végeztünk. Elsőként, a ragasztóanyag térhálósodását követően, vagy normális irányú, vagy nyíró kötésvizsgálatoknak vetettük alá. Ezekhez a vizsgálatokhoz ugyanazt a 6 titáninzertet használtuk fel minden esetben, majd azok végeztével a ragasztóanyagot 550 °C-on leégettük a felületükről, így újra fel lehetett használni őket. A roncsolásos vizsgálatok után a kompozitlemezek töretfelületeit 3D profilmérőgép segítségével vizsgáltuk.



**3. ábra.** A ragasztott kötés létrehozásának lépései: (a) drót levágása, (b) felület tisztítása acetonnal, (c) ragasztó komponenseinek megfelelő kimérése, (d) ragasztó összekeverése, (e) drótok elosztatása, (f) ragasztó egyenletes elosztatása, (g) inzert lemezre helyezése, (h) összenyomás, (i) maradék ragasztó eltávolítása

### 2.3.1. Normális irányú kötésvizsgálat

A normális irányú kötésvizsgálatokat Zwick Z005 univerzális anyagvizsgáló berendezéssel végeztük el. A gépet ±5 kN-os mérőcellával szereltük fel, és a méréseket 2 mm/perc előterhelési sebességgel és 10 mm/perc keresztfej-elmozdulási sebességgel végeztük. A vizsgálat elvégzéséhez speciális befogóra volt szükség (4. ábra).

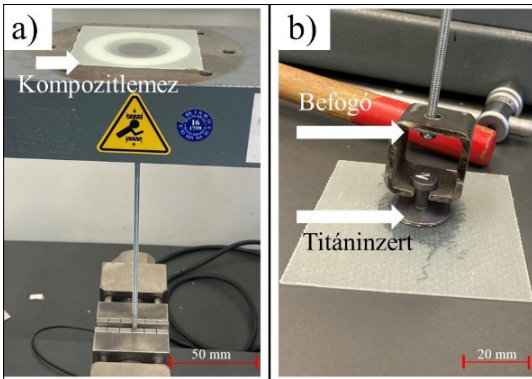
### 2.3.2. Nyíró kötésvizsgálat

A nyíró kötésvizsgálatokat Zwick Z250 univerzális anyagvizsgáló géppel végeztük ugyanazzal a sebességgel, mint a normális irányú kötésvizsgálat esetében. A készülék ±20 kN mérőcellával volt felszerelve. Ebben az esetben másik befogóra volt szükségünk a teszt elvégzése során (5. ábra).

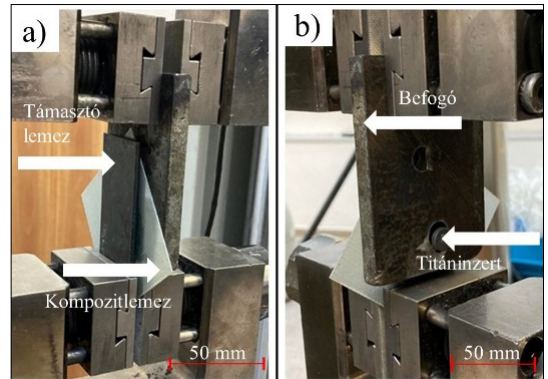
### 2.3.3. Felületi topográfiai vizsgálat

A topográfiai vizsgálatot Keyence VR-5200 optikai mérőberendezéssel végeztük el. A vizsgálat során kis nagyítást (12×) használtunk széles látómezővel. A készülék mérési pontossága ±2,5 μm, és 4 megapixeles, monokróm CMOS képfelvevő rendszerrel van felszerelve.

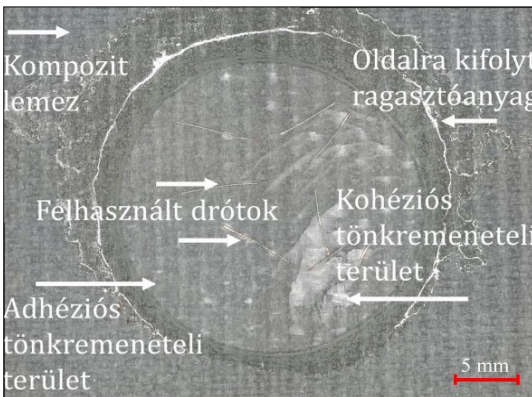
A lemez bázispontjainak meghatározása után az adhéziós és kohéziós tönkremeneteli területek arányát határoztuk meg mindegyik minta esetén, a mérőgép programjának segítségével. A kiértékelés



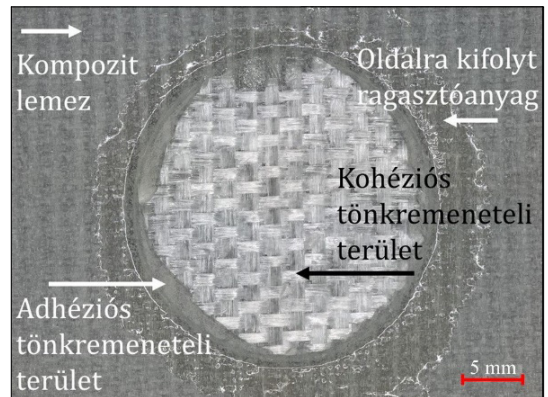
4. ábra. Normális irányú kötészvizsgálat: (a) speciális befogó, (b) vizsgálati elrendezés



5. ábra. Nyíró kötészvizsgálat: (a) hátulról (b) előlről



6. ábra. Adhéziós tönkremenetelre jellemző tönkremenetel felületi topográfiai felvétele



7. ábra. Kohéziós tönkremenetelre jellemző tönkremenetel felületi topográfiai felvétele

lés során a magasságkülönbségek alapján lehetett megkülönböztetni a tönkremeneteli típusokat.

### 3. Eredmények

A normális irányú kötészvizsgálatokat mind az öt, korábban említett ragasztóréteg-vastagságú csoporton elvégeztük. Az első (a kontroll-) csoport 5, míg az összes többi csoport 6 mintából állt, összesítve tehát 29 mintadarabon végeztük el a mérést.

Nyíró kötészvizsgálatot az első (kontroll-) és az ötödik (1,30 mm vastagságú fémhuzallal készített mintából álló) csoporton végeztünk. Mind a két csoport 6 db mintát tartalmazott, azonban az utóbb említett csoport első mintáját ki kellett vennünk a mérésből a mintaalkészítés során fellépő hiba miatt, így összesen 11 mintát vizsgáltunk ezzel a módszerrel.

A felülettopográfiai vizsgálatokat mind a 40 mintán elvégeztük az előbb említett mérések követően. A kapott adatok és a mérőgép képfel-

dolgozó szoftverének köszönhetően az adhéziós (6. ábra) és a kohéziós (7. ábra) tönkremenetel mutató területek aránya meghatározható volt.

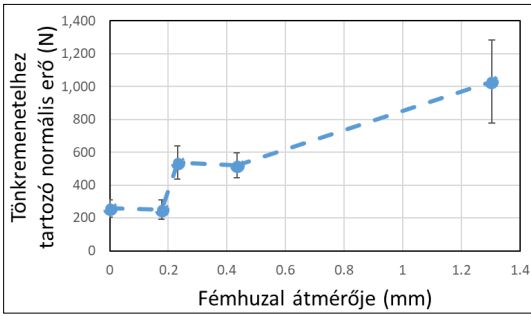
#### 3.1. A normális irányú kötészvizsgálat eredményei

A vizsgálat eredményei az alább ábrázolt diagramon figyelhetők meg, ahol a felhasznált fémhuzal függvényében látható a kötés tönkremeneteléhez szükséges maximális erő (8. ábra).

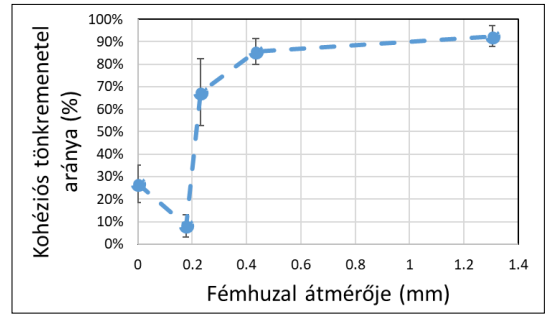
A vizsgálat végeztével a töretfelületek leképezését is elvégeztük a lemezmintákon. Ennek a vizsgálatnak az eredményei alább láthatóak, ahol a fémhuzal méretének függvényében ábrázoltuk a kohéziós tönkremenetel százalékát (9. ábra).

#### 3.2. A nyíró kötészvizsgálat eredményei

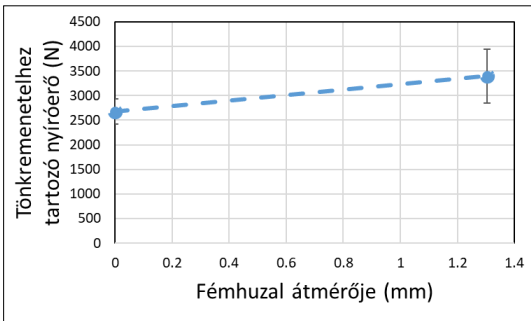
A 10. ábra a nyíró kötészvizsgálatok eredményét mutatja, az x tengelyen a huzal átmérője, az y tengelyen pedig a tönkremenetelhez tartozó nyíróerő látható.



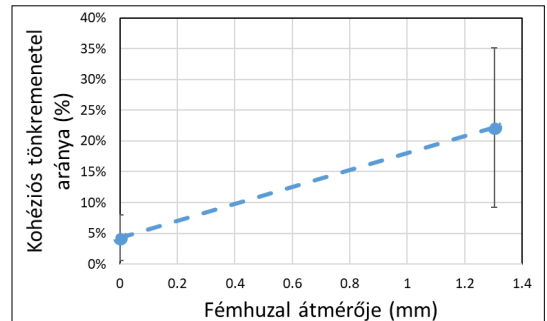
8. ábra. A normális irányú kötészvizsgálat eredményei



9. ábra. A normális irányú kötészvizsgálat utáni topográfiai vizsgálat eredményei



10. ábra. A nyíró kötészvizsgálat eredményei



11. ábra. A nyíró kötészvizsgálat utáni topográfiai vizsgálat eredményei

A szakítóvizsgálatokhoz hasonlóan a nyíró kötészvizsgálatok után valamennyi minta esetében elvégeztük az optikai mikroszkópos vizsgálatokat, és meghatároztuk a kohéziós tönkrementel százalékos értékét (11. ábra).

#### 4. Következtetések

A kutatás során összesen 40 mintadarabot gyártottunk és vizsgáltunk meg mechanikai és topográfiai vizsgálati módszerekkel. A kutatás eredménye alapot nyújthat a ragasztott szerkezetek további összehasonlító vizsgálataihoz. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Polimertechnika Tanszékén a ragasztott kötések 3D profilmérőgéppel való vizsgálati módszerét dolgoztuk ki, amellyel számszerűen jellemezhetővé és összehasonlíthatóvá váltak a tönkrementeli típusok, ezzel elősegítve a további kutatásokat ezen a területen.

A ragasztóréteg vastagságának változtatása jelentős hatással van a kötés tönkrementeléhez tartozó erő nagyságára. Megállapítható, hogy a terhelési iránytól nagymértékben függ a szerkezet teherbírása, valamint az egyes irányokban eltérő az optimális rétegvastagság.

Megfigyelhető, hogy a ragasztott, többanyagú hibrid szerkezeteket úgy kell megtervezni, hogy elsősorban nyíróterhelés érje a kötést, mivel az jelentősen nagyobb erőket képes elviselni.

A húzóvizsgálatokhoz képest a ragasztóréteg vastagsága nem befolyásolta olyan nagymértékben a kötés teherbírását nyírófeszültség esetén.

Látható, hogy a gyártó által ajánlott optimális rétegvastagság (0,05–0,1 mm) nem megfelelő normális irányú terhelés esetén, a ragasztó rétegvastagságának növelésével ennek az értéknek kb. 4-5-szörösére tudtuk növelni a kötés teherbírását.

A mechanikai és a vizuális vizsgálatok eredményei ugyanazt a tendenciát mutatják, és összehasonlíthatóak. Azok a minták, amelyeknél nagyobb kötési teherbírást mértünk, nagyobb kohéziós tönkrementeli területet mutattak a vizuális vizsgálatok során, amelynek oka lehet a nagyobb méretű, szilárd kötést biztosító anyagréteg aránya a kötési felületen.

Tekintve, hogy az általunk vizsgált szerkezetekre nem a tisztán nyíró, amely kedvező lenne a kötés szempontjából, hanem az összetett terhelési mód jellemző, így kifejezetten nagy jelentősége van a különböző irányú terhelések vizsgálatának,

amely kiinduló alapja lehet a kutatásunk. Az általunk alkalmazott mérési módszertannal optimalizálni lehet a ragasztott szerkezetek összetett terheléssel szembeni ellenállását.

Összefoglalva megállapítható, hogy ez a kutatás kiindulópontja lehet a ragasztott szerkezetek további vizsgálatának, valamint igazoltuk a ragasztóanyag rétegvastagságának jelentőségét az összetett ragasztott szerkezetek gyártása során.

### Köszönetnyilvánítás

A publikáció az Innovációs és Technológiai Minisztérium NTP-SZKOLL-22-0080 kódszámú Nemzeti Tehetség Program pályázatának támogatásával valósult meg. A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA FK 142540, 2019-1.1.1-PIACI-KFI-2019-00139, 2022-2.1.1-NL-2022-00012 pályázataival támogatásával valósult meg.

### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Adams R. D.: *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2. ed. Woodhead Publishing, Cambridge, 2021. 3–4.
- [2] Pethrick R. A.: *Design and ageing of adhesives for structural adhesive bonding-A review*. Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl., 229. (2015) 349–379.  
<https://doi.org/10.1177/1464420714522981>.
- [3] Baldan A.: *Adhesion phenomena in bonded joints*. Int. J. Adhes. Adhes., 38. (2012) 95–116.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.04.007>.
- [4] Banea M. D., Da Silva L. F. M., Campilho R. D. S. G.: *The effect of adhesive thickness on the mechanical behavior of a structural polyurethane adhesive*. J. Adhes., 91. (2014) 331–346.  
<https://doi.org/10.1080/00218464.2014.903802>.
- [5] Seong M. S., Kim T. H., Nguyen K. H., Kweon J. H., Choi J. H.: *A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum*. Compos. Struct., 86. (2008) 135–145.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.026>.
- [6] Davis M. J., McGregor A.: *Assessing adhesive bond failures: mixed-mode bond failures explained*. ISASI Aust. Saf. Semin. Canberra, (2010) 1–13.
- [7] Valenza A., Fiore V., Fratini L.: *Mechanical behaviour and failure modes of metal to composite adhesive joints for nautical applications*. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 53. (2011) 593–600.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-010-2866-1>.
- [8] Banea M. D., Da Silva L. F. M.: *The effect of temperature on the mechanical properties of adhesives for the automotive industry*. Proc. Inst. Mech. Eng. Part. L. J. Mater. Des. Appl., 224. (2010) 51–62.  
<https://doi.org/10.1243/14644207JMDA283>.
- [9] Li J., Yan Y., Zhang T., Liang Z.: *Experimental study of adhesively bonded CFRP joints subjected to tensile loads*. Int. J. Adhes. Adhes., 57. (2015) 95–104.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.11.001>.
- [10] Marshall S. J., Bayne S. C., Baier R., Tomsia A. P., Marshall G. W.: *A review of adhesion science*. Dent. Mater., 26. (2010) 11–16.  
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2009.11.157>.
- [11] Saraç İ., Adin H., Temiz Ş.: *Experimental determination of the static and fatigue strength of the adhesive joints bonded by epoxy adhesive including different particles*. Compos. Part. B. Eng., 155. (2018) 92–103.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.006>.
- [12] Huntsman Advanced Materials GmbH Switzerland, Araldite® 2011 *Structural Adhesives technical data sheet*. 2014. <https://docs.rs-online.com/afb0/0900766b81331047.pdf> (letöltve: 2023. július 4.)

# Egy meghibásodott turbófeltöltő károsodáselemzése

## Failure Analysis of a Damaged Turbocharger

Dobránszky János

Magyar Kutatási Hálózat, HUN-REN-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapest, Magyarország,  
Dobranszky.Janos@eik.bme.hu

### Abstract

Failure analysis, carried out in order to explore the causes of the failure of equipment, is one of the most complex types of material testing work. It is not only necessary to know a wide range of material testing procedures, but also to have sufficient experience in performing a significant part of them and evaluating the test results. As an example of this, the article describes the investigation of the cause of failure of a car engine component that became damaged during normal service. The examinations include various methods of optical microscopy, scanning electron microscopy, EDS analysis and fractography. From the results of the failure analysis, it can be concluded that the root cause of the failure was, most probably, abnormal wear of some components, wear that can be traced back to small manufacturing inaccuracies.

**Keywords:** failure analysis, optical microscopy, scanning electron microscopy, wear.

### Összefoglalás

A gépszerkezetek meghibásodása okainak kiderítése céljából végzett károsodáselemzés az anyagvizsgálati munka egyik legösszetettebb válfaja. Nemcsak ismerni kell hozzá az anyagvizsgálati eljárások széles körét, de ezek jelentős részének végzésében és a vizsgálati eredmények értékelésében kellő tapasztalatra is szükség van. Ennek a példájaként a cikk ismerteti egy üzemelés közben meghibásodott gépkocsimotor-alkatrész meghibásodási okának kivizsgálását. A vizsgálatok kiterjednek az optikai mikroszkópia, a pásztázó elektronmikroszkópia, az EDS-elemzés és a fraktográfia különféle módszere. A károsodáselemzés eredményeiből arra lehet következtetni, hogy a meghibásodás gyökéroka egyes alkatrészek rendellenes kopása volt, ami apró gyártási pontatlanságokra vezethető vissza.

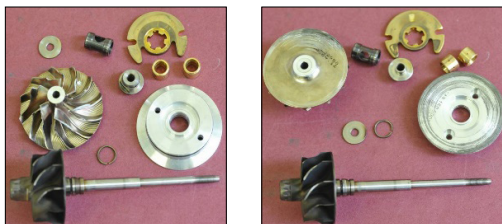
**Kulcsszavak:** károsodáselemzés, optikai mikroszkópia, pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat, kopás.

## 1. A károsodott berendezés

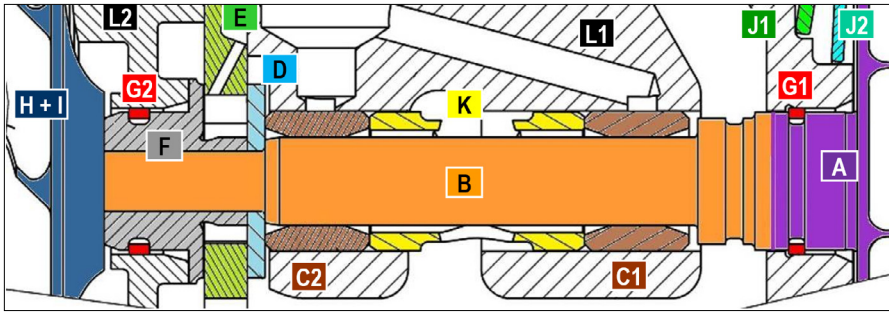
A károsodás miatt vizsgált turbófeltöltő belső alkatrészeit az **1. ábra** mutatja. A szerelvények összeállítási rajza a **2. ábrán** látható, az alkatrészek elnevezésével. A vizsgálat célja az volt, hogy meghatározzuk a károsodási formákat és a lehetséges kiváltó okokat. A károsodáselemzés általános szabályai [**1**, **2**, **3**] szerint az alkatrészeket optikai és pásztázó elektronmikroszkópokkal vizsgáltuk, egyes felületeken a kémiai összetételt is elemeztük EDS-elemzéssel.

A **2. ábra** alapján könnyű belátni, hogy egy rendkívül összetett, sok alkatrészből álló berendezésről van szó, amelynek az üzemi igénybevételeiről tudni kell, hogy percenként akár több tíze-

zer fordulaton is működhet. A **3. ábrán** összeszerelve látható a teljes belső szerelvény; az ábrán meg vannak jelölve a vizuális vizsgálattal észlelt károsodási helyek és módok.



**1. ábra.** A meghibásodott turbófeltöltő belső szerelvényének alkatrészei; a turbina + tengely szerelvény teljes hosszúsága 120 mm



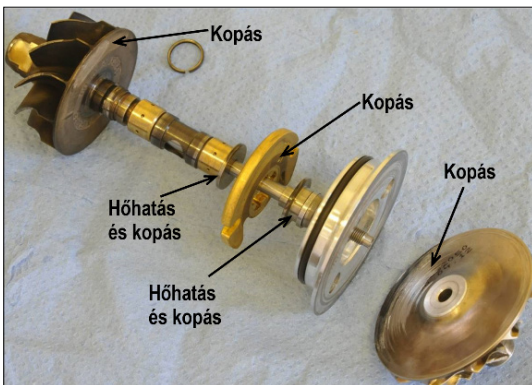
**2. ábra.** A turbófeltöltő tengelykörnyezeti szerelvényei: A = turbinakerék, B = tengely, C = csapágypersely, D = csapágyalátét, E = axiális csapágy, F = tömítőpersely, G = labirintgyűrű, H = hátlap, I = kompresszorkerék, J = hővédőlemez (tányérrugó), K = csapágypersely-távtartó, L = ház

A **3. ábrán** látható kopásokból arra lehet következtetni, hogy a turbina mozgó alkatrészeinek forgástengelye megbillent, és emiatt a mozgó alkatrészek hozzáérttek a rögzített vagy álló alkatrészekhez. A lehetséges kopásoknál meg kell említeni a ház ötvényének szemközti felületeivel való érintkezés lehetőségét. Ezt az alkatrészt a károsodáselemzés megrendelője nem adta át vizsgálatra, tehát nincsen róla adat. Mindazonáltal egyáltalán nem kizárt, hogy azok az alkatrészek, amelyek a **2. ábrán** jól láthatóan közel esnek a ház egyes felületeihez, éppen azokkal a felülettel kerültek súrlódási és kopási érintkezésbe.

## 2. A turbina és a tengely vizsgálata

A turbinakerék anyaga hőálló nikkelötvözet, összetétele: Ni-12,5Cr-6Al-4,5Mo-2Nb-Fe-Ti, a tengely anyaga pedig 1,5Cr-0,5Mo ötvöztetésű melegsziárd acél. A dörzshegesztéssel kialakított turbina + tengely szerelvény látható a **4. ábrán**. A turbina homloklapján és a tengelyen kialakult kopás nyomait mutatja az **5. és 6. ábra**.

A turbinakeréknek az **5. ábrán** látható sérülése a lapátartó alaplapon szembevetendő. A kopás csak a kör alakú alaplap kerületének kb. egyharmadára terjed ki, de ott erős. Mivel a felület szinte teljesen tiszta, feltehető, hogy a kopásra vezető



**3. ábra.** A turbófeltöltő belső szerelvényei lazán összeszerelt állapotban



**5. ábra.** Kopási nyomok a turbinán



**4. ábra.** Az összehegesztett turbina + tengely



**6. ábra.** Kopási nyomok a tengelyen

üzemzavar után a turbófeltöltő nem vagy csak nagyon rövid ideig üzemelt. A kopási folyamat másik eleme feltehetően a hővédőlemez vagy/és a turbínaház szemközti felülete volt.

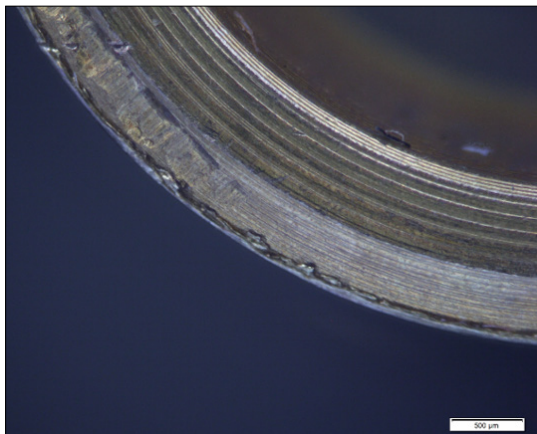
A tengely kopására a csapágyperselyek alatti felület kifényesedése utal. Mikrométer méréspon-tosságú mérőeszközzel átmérőcsökkenés nem mérhető, de a felületi kopás jól észlelhető.

### 3. A csapágyperselyek vizsgálata

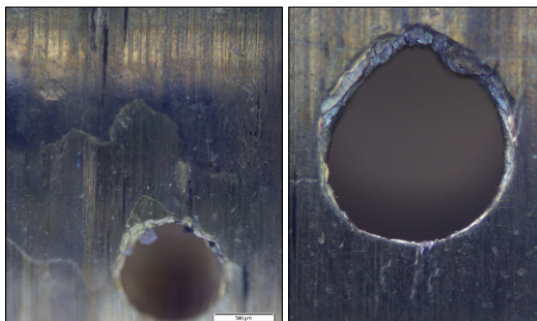
A csapágyperselyek hengeres gyűrűjének homlokfelületén sorjásodás látható (7. ábra).

A külső és belső felületen egyaránt szembeötlő a sárgaréz alapanyagon szürke színű foltok kialakulása (8. ábra). Az EDS-elemzés szerint a foltok anyagrakenődések, amelyek anyaga főleg Fe, Cr, Ni, helyenként Sn és Pb. A furatoknál az él erős felmelegedésére utaló alakváltozás látható, esetenként pedig részleges eltömődés.

Az egyik csapágy belső felületére a 9. ábrán látható anyagdarabka tapadt. Az EDS-elemzés alapján ausztenites acélként lehetett azonosítani: Fe-1,7Al-2,7Si-1,9Mo-16,9Cr-2,5Mn-9,4Ni.



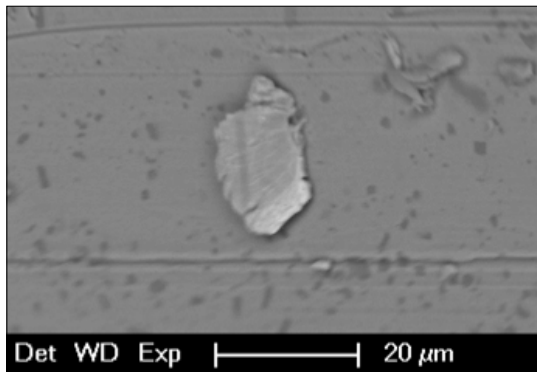
7. ábra. Sorjaképződési nyomok a csapágyon



8. ábra. Kopási nyomok a csapágy furatai peremén

### 4. Az axiális (tám-) csapágy vizsgálata

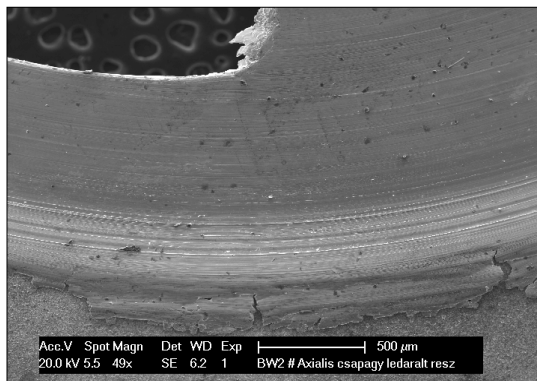
A támcsapágyon (10. ábra) keletkezett kopási nyomok láthatók a 11. ábrán. Durva kopási barázdák alakultak ki a felületen, a felső anyagréteget sorjaként kopréselve az érintkezési felületen kívülre.



9. ábra. A csapágy belső felületén letapadt forgács



10. ábra. A támcsapágyon kialakult kopási nyomok



11. ábra. A támcsapágyon kialakult kopási nyomok



12. ábra. Kopási nyomok a sűrítőkeréken

## 5. A sűrítőkerék vizsgálata

A 12. ábrán látható sűrítőkerék anyaga: Al-2Mg-2Ag-1Fe-2Ni-3Cu-0,1Zn-0,2Ti-0,35Si-0,1Mn; a bevonat anyaga: ~10% P-tartalmú nikkelötvözet. A kopási folyamatra a rideg bevonat megrepedése és lepattogzása a leginkább jellemző mechanizmus.

## 6. A károsodáselemzés értékelése

A turbófeltöltő károsodásának lényegéről kialakult értékelés fő megállapításai a következők:

Az alkatrészek felületére kerültek idegen anyagok; ezek szerves szennyeződések és más alkatrészek kopásának terméke. Érdemi kapcsolat az

idegen anyagok és valamelyik alkatrész kopása között nem mutatható ki.

A különféle alkatrészekből olyan mennyiségű anyag hiányzik a kopás következtében, hogy ez önmagában is az általános és erőteljes kopást teszi a károsodási folyamat lényegévé.

A különféle alkatrészekből hiányzó anyag mennyiségét nem tudtuk meghatározni, mivel nem ismerjük az alkatrészek pontos tömegét a beépítés előtti állapotban. A károsodási folyamatok elemzésében erre célszerű lenne figyelmet fordítani.

Általában kulcsfontosságú a turbinaoldali labirintgyűrű-horony és a labirintgyűrű károsodása (G1 és G2 a 2. ábrán), de ennél az esetről a szóban forgó alkatrészekon nem volt jelentős a kopás.

A nagy átmérőjű alkatrészekon – turbinakerék, sűrítőkerék – a kopások a forgástengelytől távoli felületeiken mentek végbe, mégpedig nem körkörös.

Következésképpen, a kopást okozó elmozdulás az egész tengelyszerelvényre kiterjedt. Ennek kialakulásáért a megvizsgált alkatrészek felelősége nem volt megállapítható. Emiatt csak az a hipotézis tűnik helyesnek, hogy az öntvényháznak azok a felületei kezdtek intenzíven kopni, amelyek a tengelyszerelvény futásának egytengelyűségét hivatottak biztosítani. A ház kopására utalnak egyébként azok a morzsalékok, amelyeket a szűrőbetétek némelyikén azonosítottunk.

## Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Zima A., Greuter E.: *Engine Failure Analysis - Internal Combustion Engine Failures and Their Causes*. SAE International, 2012.
- [2] Brooks C. R., Choudhury A.: *Failure Analysis of Engineering Materials*. McGraw-Hill, 2001.
- [3] Baratto G., Guérin J. J., Mongis J., Tournier C., Vieu A.: *Analyse morphologique des défaillances d'organes de machines*. CETIM, 2005.





## Orvosieszköz-tervezés a kézmozgás támogatására

# Medical Device Design to Support Hand Movement

Egerszegi Boglárka Fanni

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Budapest, Magyarország  
egerszegibogi@gmail.com

### Abstract

After accidents, neurological disorders, and cerebrovascular diseases, patients must learn to perform their daily tasks with their new, changed life situation, in which they can be helped by various ergotherapy aids. In the course of my work, I aimed to develop an aid that not only tries to correct the errors of products found on the market, but also a multifunctional aid that serves several types of disability, and which can be worn by individuals with upper limb involvement and living with locomotor diseases/locomotor disorders/changes. An important aspect in the design of the aid was, among other things, that it can be used in any environment and during any activity and that it should be comfortable to wear.

**Keywords:** *special design, 3D modelling, product design, ergotherapy.*

### Összefoglalás

A baleseteket, neurológiai rendellenességeket, cerebrovaszkuláris betegségeket követően a pácienseknek meg kell tanulniuk új, megváltozott élethelyzetükkel mindennapi feladataikat ellátni, melyben segítségükre lehetnek különböző ergoterápiás segédeszközök. Munkám során egy olyan segédeszköz fejlesztését tűztem ki célul, ami nem csupán a piacon fellelhető termékek hibáit igyekszik kijavítani, hanem egy olyan multifunkcionális, több típusú akadályozottságot kiszolgáló segédeszköz, amelyet a felső végtagot érintő, mozgásszervi betegséggel/mozgásszervi meg/elváltozással élő egyének bátran viselhetnek. A segédeszköz-tervezésben fontos szempont volt többek között, hogy bármilyen környezetben és tevékenység során használható, és hogy viselése kényelmes legyen.

**Kulcsszavak:** *speciális tervezés, 3D tervezés, terméktervezés, ergoterápia.*

## 1. Bevezetés

Egyes országokban az ergoterápia és az ergoterapeuta kifejezéseket használják a foglalkozási terápia és a foglalkozási terapeuta helyett. A szakma jelképének az élet hieroglif jelét (☩) választották az ókori egyiptomi írásból [1].

A reumás betegségek okozta kézműködési zavarokat az ergoterápia segédeszközökkel segíti kezelni. A kézre irányuló terápiás beavatkozások fő anatómiai területe a csukló- és ujjizületek, a feladat pedig e testrészek posztoperatív vagy konzervatív kezelése. Az ergoterápia célja az ízületek mozgásképességének fenntartása, az izmok erősítése, a torzulások korrekciója, a fájdalomcsillapítás vagy a gyulladáscsökkentő kezelés [2].

Magyarországon az ergoterápiáról szóló első közlemény közel 80 éve jelent meg [3], a legújabb pedig alig néhány hónappal ezelőtt [4]. Részletes ismertetést közöl Mogánné Tölgyesy Szilvia a szakterület hazai fejlődéséről [5], és kifejezetten a mozgásjavítási célból alkalmazott kezeléseket ismerteti tanulmányában, szerzőtársaival, Bartos Adél [6].

A szakma önálló, magyar nyelvű folyóirata, bő 30 éve, a *Rehabilitáció*.

## 2. Témaválasztás, a felhasználói kör meghatározása

Kutatásom témájának olyan orvosi segédeszköz tervezését választottam, mely elsősorban felső végtagi érintettségű mozgásszervi betegséggel

vagy neurológiai rendellenességgel élő személyek számára könnyíti meg mindennapi tevékenységüket. Célom, hogy az általam tervezett orvosi eszköz segítse a felhasználók életét a legegyszerűbb feladatok elvégzésétől a számukra legbonyolultabbnak bizonyulóig.

A felhasználói kör kiválasztásakor olyan, fokozottan korlátozott személyeket választottam, akik az alább felsorolt mozgásszervi rendellenességek valamelyikétől szenvednek:

- hemiplégia (féloldali bénulás),
- hemiparézis (ellenoldali testfél gyengesége),
- cerebrális parézis (agyi bénulás),
- reumatoid arthritisz (reumás ízületi gyulladás).

További célcsoportot képeznek az ún. időszakos felhasználók, akik valamilyen sérülés, trauma – például kéztörés – következtében szorulnak bizonyos segédeszközök igénybevételére.

A felhasználói kör meghatározásakor fontos szempont volt, hogy minél több csoportot érintsen a kiválasztás, hiszen a tervezési feladat fő célja egy komplex megoldást nyújtó eszköz megtervezése volt.

Az általam tervezett orvosi eszköz méreteinek meghatározásához nem volt elegendő az analógiák geometriai sajátosságainak vizsgálata. A PeopleSize katalógus vonatkozó fejezeteit tanulmányoztam át a felnőtt emberi kéz méreteinek megállapításához, továbbá vizsgáltam az elérési tartományokat egyes esetekre. Azokat az adatokat, melyek a katalógusban nem szerepeltek, mint például a csuklóméretet meghatározása, egy harmincmintás mérésrel állapítottam meg.

Az eredmények értékelését követően az átlagos és percentilis értékeket is meghatároztam, nemekre történő lebontásban.

### 3. A szabványok vizsgálata

Minden, piacon lévő termékre vonatkoznak különböző szabályok, szabványok, melyeknek a termékeknek meg kell felelniük. Munkám során a betartandó szabványok az egyetemes tervezésre vonatkoztak, ezen belül az akadálymentesség szabályait kötötték ki.

A magyar nyelven is kiadott, ISO 9999:2007 szabvány [7] meghatározza a kifejezetten fogatékkal élők számára gyártott vagy általánosan elérhető segédeszközök osztályozását. A használathoz más személy segítségét igénylő segédeszközöket is tartalmazza. Jelenleg a legfrissebb szabvány az általam fejlesztett terméket illetően, a címét tekintve is jelentősen módosított MSZ EN ISO 9999:2023 [8].

### 4. Anyagválasztás

A termékemnek számos higiéniai, mechanikai, élettani feltételnek kell megfelelnie, melyek közül kiemelendő a biokompatibilitási tulajdonság. Mivel igen széles spektrumú rendellenességeket igyekeztem a felhasználói kör azonosításakor lefedni, figyelembe kellett vennem a rendellenességekkel esetlegesen előforduló betegségeket is, mint például azok a bőrbetegségek, melyeknél az érintett páciens bőre kisebbedik, a bőr védő funkciója nem teljes.

Ezeknek a követelményeknek való megfeleléshez orvosi eszköz céljára alkalmas szilikont választottam a pánt alapanyagául.

Higiéniai tulajdonságokat elemezve, a szilikont lehet legkönnyebben tisztán tartani, hiszen nem ázik át, vízlepergető, egyszerűen fertőtleníthető. Fizikai jellemzőit tekintve ütésálló, nyújtható, emellett mégis puha tapintású. Bőrrel érintkezve nem okoz irritációt, így a pánt hosszabb ideig történő viselése biztonságosnak tekinthető.

A kétkomponensű önthető szilikonok közül a RTV kétkomponensű anyagra esett a választásom. Mivel bőrrel érintkező termék elkészítéséhez használom, így csak élelmiszeripari felhasználásra alkalmas katalizátor használatát tekintettem megengedettnek.

A magyarországi székhelyű gyártók közül a Bondex Kft. Rubosil SR-30 megnevezésű, peroxidos szilikon terméke felel meg a fenti kritériumoknak, hiszen egyike azon kevés anyagoknak, melyek OÉTI- (Országos Élelmezés- és Táplálkozástudományi Intézet) engedéllyel rendelkeznek. A termék főbb jellemzőit az **1. táblázat** mutatja [9].

**1. táblázat.** A Rubosil SR30 anyagtulajdonságai

Bedolgozási, fazékidő	20 min
Kötési, kikeményedési idő	30 min
Keményység	30±5 ShoreA
Hőállóság	-55–200 °C
Viszkózitás	26 500 ± 1500 m·Pa·s (vagy cP)
Sűrűség	1,40 g/cm <sup>3</sup>
Hasadási ellenállás	4,86 N/mm
Szakítószilárdság	1,88 N/mm <sup>2</sup>
Szakadási nyúlás	140%

A Rubosil SR-30 szilikonhoz a gyártó a Rubosil K Food megnevezésű katalizátort javasolja, melyre a gyártó szintén megszerezte az OÉTI engedélyét. 1 kg szilikonhoz 50 mL katalizátor hozzáadása szükséges. A választott szilikon legjellemzőbb felhasználási területei közé az élelmiszeripari és a cukrászati öntőformák tartoznak. Emellett bőrrel érintkező termékek is igazoltan gyárthatók belőle, mint pl. lábujj-szétválasztó, ill. -terpesztő és egyéb protézisek.

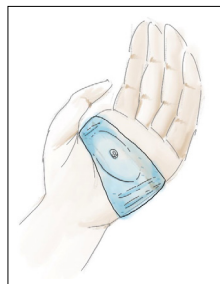
A 3D-s nyomtatott alkatrészek – funkcionális fejek, kapcsok – elkészítéséhez műgyantát választottam: a 3D JAKE gyártó fehér színű, 3D Printer Tough Resin termékét. Ez egy nagy keménységű fotopolimer műgyanta, melyet SLA nyomtatóval lehet használni. Az anyagösszetételt a gyártó nem tette nyilvánossá, az anyag kiválasztását a korábbi, prototípusgyártási folyamatok indokolják. Előként docamid anyagból, a szálkiszajtolás [10] aditív gyártási eljárás FDM eljárásváltozatával készültek az alkatrészek. A gyártási eljárásból adódóan nagy az elemek felületi érdessége, továbbá a húzó igénybevétel hatására a gömb alakú elemek elváltak az alapjuktól. A gyártási módot ezt követően SLA eljárásváltozatra cseréltem; ekkor nagy keménységű, de nem rugalmas gyantával dolgoztam [11].

Az alkatrészek az anyagválasztás miatt ridegek lettek, a bepattintható kötés a harmadik bekapcsolásra maradandó alakváltozást szenvedett, majd eltört. Ezek a tapasztalatok indokolták a megjelölt termék használatát. Az alkatrészek keménysége és kopásállósága jobbnak bizonyult, továbbá a bepattintható kötés sem deformálódott, annak ellenére sem, hogy több mint húsz összeszétkapcsolási ciklust végeztem el.

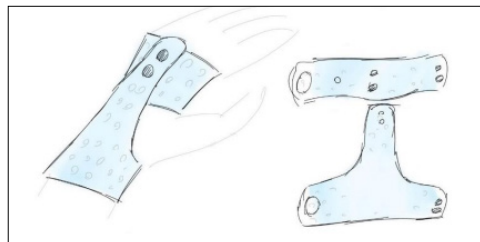
## 5. A termék koncepció meghatározása

Az információgyűjtési munkám során számos konkurens terméket elemeztem. Vizsgáltam ezeknek a termékeknek az erősségeit és hiányosságait, hogy a pozitív jellemzőket átdolgozva és átültetve, a negatív tulajdonságokat pedig kijavítva olyan termékjavaslatot alkothassak, amely a lehető legtöbb felhasználói igény kielégítésére alkalmas. Az információk feldolgozását követően követelményjegyzéket állítottam fel.

A piacutatás során több tartót, fogantyút vizsgáltam meg, így ezek ötvözéséből született az ötlet: egy olyan szilikonpánt (1. és 2. ábra), amelyben 3D-s nyomtatott talp található, melyhez, igény szerint, oldható bepattintható kötéssel csatlakoztathatók egyes multifunkcionális fejek,



1. ábra. Az első termék koncepció kézfej felőli oldala



2. ábra. Egy továbbfejlesztett termék koncepciónak a kéz hát felőli oldala

melyek adott tárgyak megfogásában, tevékenységek elvégzésében segédkeznek; pl. evőeszköz, fogkefe, íróeszköz megfogása, gomb begombolása, cipzár felhúzása.

A műanyag betét a pánt tenyér felőli oldalán helyezkedik el, egy megnövelt vastagságú szilikonpárnába (az ún. magba) építve, úgy, hogy csak a bepattintásra alkalmas része lóg ki a pántból. Így a felhasználót nem zavarja akkor sem, ha épp nincs használatban.

A szilikonpánt tenyér felőli oldalán, a mag mellett, csúszásgátló bordákat helyeztem el, ezzel biztosítva a fogást, a megtartást.

A kéz háti oldalon perforációkat kell kialakítani, ezzel elérve a bőr levegővel való érintkezését, illetve így csökkenthető a használt anyagmenyiség, ez pedig a termék súlyát és árát is befolyásolja.

A termékhez minél kevesebb, ám minél több módon felhasználható fejeket és pántokat terveztem, amelyek elférnek akár zsebben vagy egy kisebb táskában is. Szerettem volna divatos, nem feltűnő, kompakt és diszkrét terméket tervezni, így segítve azokat a felhasználókat is, akik szeretnék elterelni a figyelmet a megváltozott helyzetükről.

## 6. A termék koncepció fejlesztése

### 6.1. Az első termék koncepció értékelése

Az interjúk elvégzéséhez rehabilitációs központokba látogattam el. A látogatásaim során érintet-

tekkel és szakorvosokkal konzultáltam a termék koncepciót illetően. Számos észrevételt osztottak meg velem az említett személyek, melyek által a termékjavaslatomat megfelelően tovább tudtam fejleszteni.

Az első kritika a pánt fel- és levételét érintette: a kéz bebújtatása nem megfelelő módszer egy felső végtag mozgásának korlátozottságával élő személy számára. A pántot tehát szíjszerű geometriára szükséges cserélni, melyet több méretre is be lehet állítani egy kapocs segítségével. Fontos emellett, hogy a pánt egyik végén gyűrűszerű perforációt kell kialakítani, hogy azok a felhasználók is önállóan fel tudják tenni, akik ujjainak mozgástartományra korlátozott. Így a gyűrűbe be tudják akasztani az ujjukat, és húzó mozdulattal a megfelelő méretűre tudják állítani a pántot. Mindezen szempontok mellett több kiegészítő tervezését is indokoltnak találtam azért, hogy a termékcsaláddá fejlődő koncepció minél több felhasználói igényt ki tudjon elégíteni.

A látogatások során vizsgáltam a funkcionális fejek geometriáját is. A visszajelzések alapján kis és nagy átmérőjű termékek megfogására is alkalmasnak kell lenniük a fejeknek, illetve az öltözködésben is segítséget kell nyújtaniuk. A felhasználóknak a gombolás, a zokni felhúzása és a cipő bekötése okozza a legnagyobb problémát. Gépelesben, érintőképernyős telefon használatában is segítségre szorulnak bizonyos felhasználók. Ehhez egy olyan fej kialakítása szükséges, mely elérhetővé teszi a pontos leütést olyan személyek számára is, akiknek az ujjuk ezt nem teszik lehetővé a beszűkült mozgástartomány miatt.

A komplex munkafolyamatok elemzése rávilágított a fej és a pánt kapcsolódásának hibáira is. Mindennapi tevékenységek végzése közben egyes eszközök megfogása és használata más irányú mozgást igényel, mely mozgás a felhasználó állapotától függően nem minden esetben megvalósítható. Emiatt a kapcsolódásnak elfordulást kell biztosítani, hogy ezek a cselekvések mindenki számára elvégezhetőek legyenek, tehát a termék kialakításából adódó esetleges hiányosságok miatt ne legyenek akadályozva a felhasználók. Ezért a bepattintható kötés geometriáját átalakítottam. Így adott tartományban gömbcsuklóként viselkedik, biztosítva a megfelelő mértékű elfordulást és hajlítást.

Az esztétikai jellemzők megvitatásakor a pánt perforálását a megkérdeztettek támogatták. Tehát egy olyan mintázat megtervezése lett a feladatom, amely húzás esetén sem szakad el, esztétikus, és a lehető legnagyobb bőrfelületet szabadon hagyja. Ezek mellett biztosítania kell a bekapcsoláshoz

szükséges feltételeket: pontosan kell illeszkednie a kapocshoz, továbbá a méretre állíthatóságot is lehetővé kell tennie.

## 6.2. A perforációk tervezése

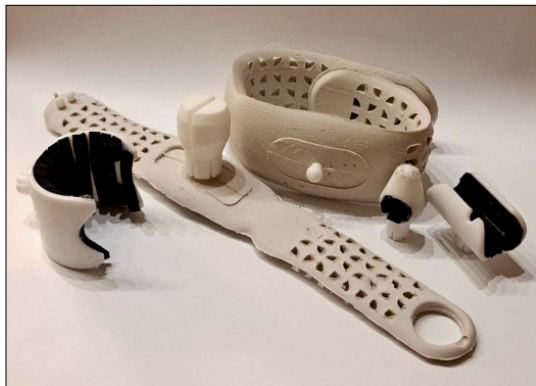
A mintázat megtervezésekor az esztétikai jellemzők szem előtt tartása mellett a lehető legkisebb bőrfelület lefedésére törekedtem úgy, hogy a pánt még meg tudja tartani az eszköztartó fejet és a benne lévő használati eszközt is. Ehhez a falvastagság és a perforációk területének arányát szükséges meghatározni, ami nem lehet kisebb 1:2-nél.

A mintázatokat Copeland-módszerrel értékelttem különböző szempontok alapján: esztétika, falvastagság, újszerűség. A kapott pontszámokat összegeztem, így kiválasztva a megfelelő mintázatot a perforációk kialakításához.

## 7. Következtetések: az eszköz végleges tervének ismertetése

A munkám során megterveztem, a kézmozgást segítő ergoterápiás segédeszköz termékcsalád olyan, esztétikus, multifunkcionális eszközöket magába foglaló termékcsalád, mely felső végtag érintettségű, mozgásszervi betegséggel vagy neurológiai rendellenességgel élő személyek számára nyújt segítséget mindennapi tevékenységeik elvégzésében.

A termékek minden, gyakran használatban lévő alkatrésze külön-külön cserélhető, ezáltal mind a gyártó, mind a vásárló szempontjából költséghatékony, továbbá így növelhető a termékélettartam is. A különböző pántgeometriák lehetővé teszik a speciális felhasználók számára az állapotuknak, elérési tartományuknak megfelelő eszközök kiválasztását és használatát, így reflektálva egyéni igényeikre.



3. ábra. Az elkészített termékcsalád prototípusa

A bőrrel érintkező pántok kétkomponensű, biokompatibilis szilikonból készültek, egyedi mintázatuk nemcsak esztétikai funkciót tölt be, hanem a bőr levegővel való érintkezését is biztosítja, így megakadályozza a bőr bepállás miatti irritációját. Emellett a perforációk a pánt két végének összekapcsolását segítik, így a megfelelő méret könnyedén beállítható, a megfelelő rögzítés egyszerűen biztosítható.

Az anyagválasztásból adódóan a terméket nem kell fel- és levenni vízzel való érintkezéskor, mert minden komponense vízálló. Egyszerűen higiénikusan tartható, hiszen a kereskedelemben lévő bőr- és eszközfertőtlenítő szerekre nem érzékeny. Számos, mindennapi tevékenységekhez használatos eszköz megfogását lehetővé teszi. Könnyen méretre állítható, emellett nemcsak a tenyér felőli oldalon teszi lehetővé az eszközök megtartását, hanem a kéz háti oldalra fordítva is alkalmazható.

Ezt a transzformálhatóságot mutató tulajdonságot azért tartottam fontosnak beépíteni, mert a megjelölt felhasználói csoportban nagy számban vannak olyan egyének, akik kézfejét nagymértékű elváltozás érte. Ezeknek az elváltozásoknak – kontaktúráknak, elcsontosodott porcoknak – a jelenléte nem teszi lehetővé azt, hogy a felhasználó a tenyerébe illesszen bármit is. Úgy véltem, hogy a kéz hátra való rögzítéssel számukra is számos, eddig elérhetetlen funkció is elérhetővé válik.

A speciális eszköztartó fejek megtervezésénél nemcsak a funkciók megfelelő teljesítésére koncentráltam, hanem arra is, hogy az egyes kiegészítők kézbe illőek legyenek, kapcsolódásuk biztos legyen, cserélhetőségük pedig ne okozzon nehézséget a felhasználók számára.

A használati eszközök rögzítésének kapcsán azt vizsgáltam, hogy miként a legegyszerűbb azokat befogni úgy, hogy ne mozduljanak el használat közben. A probléma megoldására számos kiala-

kítást terveztem, egyes javaslatokba a befogni kívánt használati eszközök típusától és geometriájától függően összerakható anyagból készítem további rögzítőt is.

A működési elvek helyességét a gyakorlatban is teszteltem egy sztrókot túlélte, hemiplegiával élő beteg, illetve ergoterapeuták bevonásával. A vizsgálat eredményei egyértelműen igazolták az elgondolás helyességét. A pozitív visszajelzések és az egyes elemeket érintő javaslatok hatására a fejlesztést a későbbiekben is folytatni kívánom.

A termékem hiánypótló, a munka elején felállított célkitűzésnek – azaz annak, hogy kompromisszumok nélküli komplex megoldást nyújtson a speciális felhasználói csoportként megjelölt felhasználók számára – megfelel. Ezek a személyek mind akadályozottak a kezük vagy kézfejük mozgásában, ami nagymértékben megnehezíti mindennapi tevékenységeik elvégzését. A kórházi rehabilitáció során azt tanulják meg, hogy miként adaptálódjanak megváltozott élethelyzetükhöz, azonban a rehabilitációt követően szinte mindegyik érintett személy valamilyen segédeszköz bevonására szorul. Termékcsaládommal az ő igényeiket igyekeztem kielégíteni.

### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Söderback I.: *Occupational Therapy: Emphasis on Clinical Practic*. In: *International Handbook of Occupational Therapy Interventions*. (Szerk.: Söderback I.). Springer, Dordrecht, 2009. 14–35. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-75424-6>
- [2] Bureck W., Illgner U.: *Hand ergotherapy for rheumatic diseases and the special importance of hand surgery*. Zeitschrift für Rheumatologie, 73/5. (2014) 424–433. <https://doi.org/10.1007/s00393-013-1342-3>
- [3] „Ego Te Restaurabo”. *Az ergoterapia az egészség-helyreállítás szolgálatában*. Magyar Kórház, 13/17. (1944) 437–438.



4. ábra. A véglegesre kidolgozott termékcsalád fotorealistikus képe

- [4] Szívügyem az ergoterápia. Császár Gabriellával Bajkay Ágnes beszélgetett. Fizioerápia. A Magyar Gyógytornász-Fizioerapeuták Társasága szakmai folyóirata, 32/1–2. (2023) 47–50.
- [5] Mogánné Tölgyesy Szilvia: Az ergoterápia hazai fejlődése. Egészségügyi Gazdasági Szemle, 45/5–6. (2007) 37–39.
- [6] Bartos A., Józsa J., Tajthy K., Tapa G., Cselovszki T., Hum K., Szigeti J., Gasparicsné Csillag Á.: Ergoterápia a mozgásjavítóban. Fizioerápia: A Magyar Gyógytornász-Fizioerapeuták Társasága szakmai folyóirata, 21/1. (2012) 23–27.
- [7] MSZ EN ISO 9999:2007 Fogyatékkal élő személyek segédeszközei. Osztályozás és szakkifejezések (ISO 9999:2007)
- [8] MSZ EN ISO 9999:2022 Segédeszközök. Osztályozás és terminológia (ISO 9999:2022)
- [9] MSZ EN ISO/ASTM 52900:2017 Additív gyártás. Általános alapelvek. Terminológia (ISO/ASTM 52900:2015)
- [10] Bondex Kft. „OÉTI engedélyes folyékony szilikon Rubosil. 2022 (letöltve: 2022. október 19.). <https://szilikonwebaruhaz.hu/id/02767-OETI-engedelyes-folyekony-szilikon-Rubosil-SR38>
- [11] Bondex Kft. „OÉTI engedélyes élelmiszeripari katalizátor önthető szilikonhoz Rubosil K Food 50 ml”. 2022. (letöltve: 2022. október 19.). <https://szilikonwebaruhaz.hu/id/02763-OETI-engedelyes-elelmiszeripari-katalizator-ontheto-szilikonhoz-Rubosil-K-Food-50-ml>



## A pozdorjaadalékos beton elemzése

### Analysis of Concrete with Chaff

Fekete L. Mátyás

Építőmérnöki Kar, Kolozsvári Műszaki Egyetem, e-mail: [feketematyas01@gmail.com](mailto:feketematyas01@gmail.com)

Témavezetők: dr. Raluca Iştoan, e-mail: [raluca.fernea@ccm.utcluj.ro](mailto:raluca.fernea@ccm.utcluj.ro)  
és dr. Elena Jumate, [elena.jumate@ccm.utcluj.ro](mailto:elena.jumate@ccm.utcluj.ro)

---

#### Abstract

Can the reintroduction of a traditional building material lessen the emission of greenhouse gas emissions of the construction industry? The study below will present the search for the answer to this question. Given that the used hemp shives, compared to cement, have low mechanical strength but act as a great thermal insulator, I tried four recipes to find the best ratio among the elements after determining the bending, compressive and tensile strengths. The study also analyzes the price of hempcrete, comparing it to the price of hollow bricks, to examine the material's viability from a financial perspective. Additionally, it compares the carbon dioxide emissions of hempcrete and bricks.

**Keywords:** *environmentally friendly, sustainable, pollutant-free, natural, thermal insulator.*

#### Összefoglalás

Vajon egy hagyományos anyag visszavezetése segíthet-e csökkenteni az üvegházhatású gázok kibocsátását az építőiparban? A jelen tanulmány e kérdés látszólag egyszerű válaszában a kutatását mutatja be. Tudva, hogy a felhasznált pelyvák, a kender mechanikai szilárdsága kicsi, de a hőszigetelő képessége nagy a cementhez képest, négy különböző receptet próbáltam ki, hogy megtaláljam az optimális arányt az összetett anyag összetevő elemei között a hajlító- és nyomószilárdságok meghatározása után. A tanulmányban elemzés tárgya a kenderbeton ára is, összehasonlítva az üreges téglák árával, hogy pénzügyi szempontból is meg lehessen vizsgálni az anyag életképességét, valamint összehasonlítom a kenderbeton és a téglák szén-dioxid-kibocsátását.

**Kulcsszavak:** *környezetbarát, fenntarthatóság, szennyezőanyag-mentesség, természetesség, hőszigetelés.*

---

#### 1. Bevezetés

Az utóbbi években növekvő tendencia az, hogy „zöld” építőanyagokat használjunk, és várható, hogy ez a piac 2030-ig megduplázódik [1]. Ennek a piacnak a szükségleteit új és innovatív anyagok létrehozásával vagy már meglévő anyagok javításával lehet kielégíteni.

Az utóbbi években a textilipar elkezdte visszavezetni a kendert a termelésbe. Mivel a kenderrost iránti igény növekszik, és ez az ipar csak a törzs külső rostját használja fel, a növény többi részét hulladéknak tekintik. Ez a maradék a kemény rost, amelyből a kenderpelyva készül.

Az építőipar és a feldolgozóipar együttesen az üvegházhatású gázok 21%-át állítják elő, ugyanakkor befolyásolják az energiafogyasztást is, amely a kibocsátott gázok 40%-át teszi ki [2]. Egy hőszigetelt épület 10%-kal kevesebb energiát igényel [3], tehát a kisebb hőátbocsátó tényezőjű anyagok használata csökkenti az energiafogyasztást.

A kenderpelyva, amelynek sűrűsége 85–90 kg/m<sup>3</sup> [4], keverhető cementtel és mésszel egy kítűnő hőszigetelő képességű, de kis mechanikai szilárdságú anyag létrehozásához; ezt az anyagot a tudományos közösség már évek óta kutatja.

## 2. Anyagok és módszer

### 2.1. Használt anyagok

Egy kiindulási pont meghatározásához reprodukáltuk Nguyen és társai 2010-ben készült HH1-es receptjét [5]. Ebben a receptben a kötőanyag és a pelyva közötti arány 2,12, a víz és a kötőanyag közötti arány 1,52.

A felhasznált pelyva a Hempflax Romania terméke volt, a cement Holcim ExtraDur 52, a hidraltált mész Carmeuse – Super Calco M. A tömörítést kézi módon végeztük.

A kenderpelyva az apróra darált, 3 milliméternél kisebb átmérőjűre darált szár. A használt cement 52,5 N/mm<sup>2</sup>-es nyomószilárdságú.

Az összes keverékbe 2,14-szer több kötőanyag került, mint pozdorja, és 1,52-szer több víz, mint kötőanyag. A négy recept különbsége a kötőanyag összetételében rejlett: a kontrollreceptben (R0) 100% oltott meszet használtunk, az első receptben (R1) 33% cementet és 67% oltott meszet, a második receptben (R2) 67% cementet és 33% oltott meszet, a harmadik receptben (R3) pedig 100% cementet.

**1. táblázat.** 5,43 dm<sup>3</sup> kötőanyag elkészítéséhez szükséges összetevő anyagok

	Kender (g)	Cement (g)	Mész (g)	Víz (L)
R0	535	0	1145	1,74
R1	535	378	767	1,74
R2	535	767	378	1,74
R3	535	1145	0	1,74

### 2.2. A sűrűség meghatározása

Minden tesztet laboratóriumi körülmények között, 15–20 °C hőmérsékleten és 30–50% relatív páratartalom mellett végeztünk el.

Az eredeti sűrűség meghatározásához az elkészített anyagot egy 1 liter (1000 cm<sup>3</sup>) térfogatú hengerbe helyeztük, majd lemértük az anyag tömegét.

A sűrűség görbéjének meghatározásához a próbatetek tömegét lemértük a mechanikai szilárdsági tesztek előtt.

### 2.3. A hajlítószilárdság meghatározása

Az anyag hajlítószilárdságának meghatározásához 3, 7, 14, 28 és 90 napos tesztek végeztünk hidraulikus présen.

Az 1-es képlet (1) [6] segítségével számíthatjuk ki a hajlítószilárdságot.



1. ábra. A hozzávalók összekeverése



2. ábra. A sűrűség meghatározása

$$R_{ti} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (1)$$

ahol  $R_{ti}$  az anyag hajlítószilárdsága,  $P$  a newtonban kifejezett erő,  $l$  a milliméterben mért távolság a gép támaszai között,  $b$  a szélessége és  $h$  a magassága a keresztmetszetnek, milliméterben kifejezve.

### 2.4. A nyomószilárdság meghatározása

Az anyag nyomószilárdságának meghatározásához 3, 7, 14, 28 és 90 napos tesztek végeztünk hidraulikus présen. A 2-es képlet (2) segítségével számíthatjuk ki a nyomószilárdságot.

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (2)$$

ahol  $R_c$  az anyag nyomószilárdsága,  $P$  a newtonban kifejezett erő,  $A$  pedig a keresztmetszet.



### 3. Eredmények

#### 3.1. A sűrűség

Ahogy a **3. ábra** adataiból látható, az anyag sűrűsége az első 3 napon jelentősen csökkent, amikor a víz aránya átlagosan 50,88%-ról 47,64%-ra csökkent. Mivel a szilárd összetevők (cement, mész és a pozdorja) nem tudnak elpárologni, csak a víz lehet a változás forrása.

Már a 7 napos teszten a sűrűség minden mintánál majdnem elérte a végleges értéket.

A cementet tartalmazó receptek (R2 – 66,67% kötőanyag, R3 – 100% kötőanyag) lassabban száradtak, mint a mészalapú receptek.

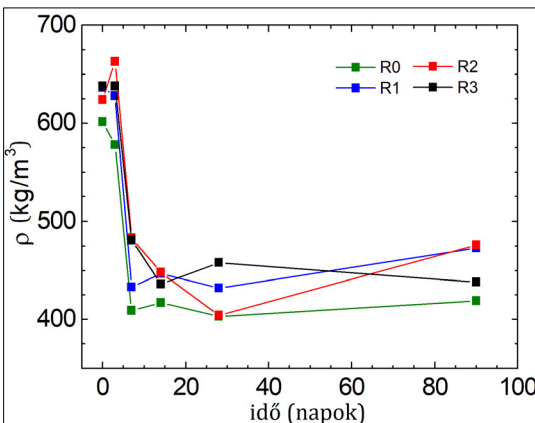
Annak ellenére, hogy száradásról beszélünk, a mésztartalmú receptekkel készült anyagok sűrűsége nőtt a száradási időszakban, ugyanis az utolsó két hét esős volt, tehát a környezeti páratartalom megnőtt.

#### 3.2. A húzószilárdság

A betonnak nem jó a húzószilárdsága, a kenderpozdorja pedig túl rövid ahhoz, hogy a betonvashoz hasonlóan jelentős mértékben ellenálljon a húzásnak. Az eredmények ezt támasztják alá.

Az R0-s kontrollanyag maximális húzószilárdsága  $0,41 \text{ N/mm}^2$  volt 14 nap után, a végső értéke pedig  $0,24 \text{ N/mm}^2$ . A modellezett recepttel készült kötőanyag 90 nap után  $0,105 \text{ N/mm}^2$  volt a húzószilárdsága. Az eredmények közti különbséget a felhasznált mész okozta, mivel nem azonos típusúak voltak – a pozdorja mindkét anyag esetén azonos méretű volt.

A húzással szemben a legjobb ellenállást az R2-es keverék érte el, amelyben a kötőanyag 33,33%-a volt mész és 66,67%-a 52,5-ös cement, mivel a



3. ábra. A kötőanyagok sűrűségének változása a száradási idő függvényében

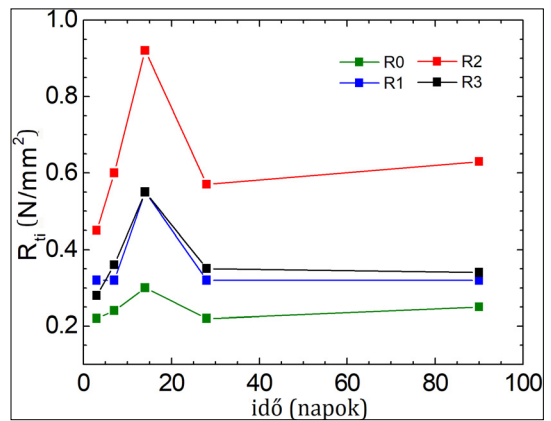
cementalapú habarcs nagyobb szilárdságú, mint egy mészalapú.

A nagy kezdeti ellenállást a cement adalékanyagai okozták, mivel „R” jelzésű, azaz gyorskötésű cementet használtam.

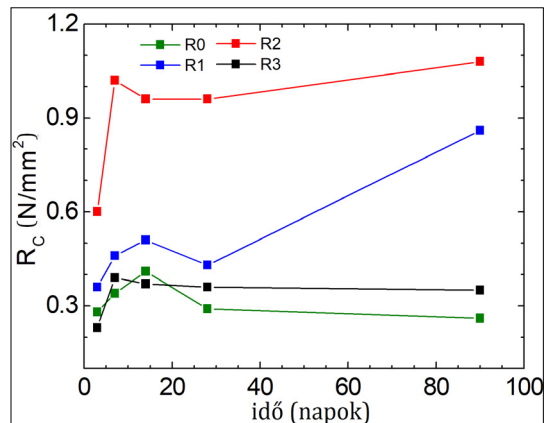
#### 3.3. A nyomószilárdság

A pozdorja kis sűrűségű és mechanikai szilárdságú anyag, így a létrehozott kenderbeton szilárdsága kisebb a hagyományos betonénál.

A kontrollrecepttel készült beton végleges nyomószilárdsága  $0,2625 \text{ N/mm}^2$ -t ért el, szemben Nguyen  $0,7 \text{ N/mm}^2$ -es eredményével. Mivel a R0 recept alapján készült anyag jobb értékeket ért el, mint Nguyen HH1 jelű betonja, de a nyomószilárdsága kisebb; ennek okát abban látom, hogy a kenderpozdorja eloszlása más lehetett. Annak ellenére, hogy a keverés azonos módon történt, lehetséges, hogy a kézi kompaktálás során a modellanyagban a rostok az anyag hossza mentén



4. ábra. A hajlítószilárdság változása a száradási idő függvényében



5. ábra. A nyomószilárdság változása a száradási idő függvényében

rendeződték el, így jelentősen hozzájárultak a húzószilárdsághoz, de szabotálva a nyomószilárdságát.

## 4. Gazdasági szempontok

### 4.1. Az alapanyagárak elemzése

Egy zsák 40 kilogrammos Holcim Extradur 52 cement ára 35 RON. Egy zsák 20 kilogrammos CL-70-S méz ár 30 RON. Egy 14 kilogrammos zsáknyi kender ára 5,415 euró, azaz 1 kilogramm 1,92 RON-ba kerül.

Összehasonlítva 1 köbméter kenderbeton árát 1 köbméter ürege téglával (520 RON/m<sup>3</sup>) megállapítható, hogy mindegyik tesztelt recept gazdaságosabb a téglafalnál.

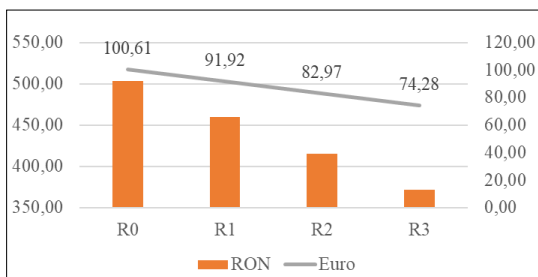
#### 2. táblázat. Az anyagárak

Recept	5,43 dm <sup>3</sup> = 0,00543 m <sup>3</sup>				1 m <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>
	Kender	Cement	Mész	Teljes	RON	Euro
R0	1,0165	0	1,7175	2,734	503,056	100,6112
R1	1,0165	0,33075	1,1505	2,49775	459,586	91,9172
R2	1,0165	0,671125	0,567	2,254625	414,851	82,9702
R3	1,0165	1,001875	0	2,018375	371,381	74,2762

Ezen árakhoz még hozzá kell adni a közvetett költségeket (víz, laboratóriumi szolgáltatások, munkadíj), amelyek nem szerepelnek az alapanyagok költségében, és a készítmény költségének 10%-át jelentik. Nagyobb beszerzés esetén az alapanyagok (cement, méz, kender) árát lehet tárgyalni a beszállítókkal, ami a termelés költségének csökkenéséhez vezethet.

### 4.2. A gyakorlatba ültetés könnyűsége

Az új technológiák bevezetésének megvalósítása nagyban függ attól, mennyire könnyű áttérni a régi modellről az újra.



6. ábra. A különféle receptek alapján készített betonok ára

A kenderbeton esetében minden intuitív, mert pont ugyanúgy zajlik, mint a hagyományos betonozás: mindent összekeverünk a betonkeverőben, fokozatosan hozzáadva a vizet, majd mindent beöntünk az öntőformába.

Ennek a módszernek az egyetlen hátránya az, hogy a méz tartalom miatt a falak csak 90 nap után érik el végleges szilárdságukat, ami késedelmet okozhat, ha az ütemtervben nem alkalmazkodtak az új módszerhez.

## 5. Környezeti szempontok

### 5.1. Szén-dioxid-kibocsátás

Egy környezetbarát anyagnak kis szén-dioxid-kibocsátásúnak kell lennie a „régii” alternatívához képest. Minden felhasznált kilogramm cement 0,81 kg CO<sub>2</sub>-t termel [7], és minden felhasznált kilogramm méz 0,75 kg CO<sub>2</sub>-t [8]. 1 kg kender 1,29 kg CO<sub>2</sub>-t szív magába [9].

#### 3. táblázat. 1 m<sup>3</sup> kenderbeton szén-dioxid-kibocsátása

	Kender (kg)	Cement (kg)	Mész (kg)	Összesen (kg)
R0	-127,12	0	157,5	31,925
R1	-127,12	56,94	105	36,36
R2	-127,12	113,87	52,5	40,80
R3	-127,12	170,81	0	45,23

Tehát kijelenthető, hogy a kenderbeton közel szén-dioxid-semleges.

Átszámítva, 1 tonna kenderbeton 50,8–71,43 kg CO<sub>2</sub>-t bocsát ki. Tekintettel arra, hogy egy tonna téglá 258 kg CO<sub>2</sub>-t bocsát ki [10], a különbség igen csak számottevő.

## 6. Következtetés

Végző soron megállapítható, hogy a kenderbeton alternatívája lehet a téglák használatának, de csak nem jelentősen terhelt szerkezeti funkciókban, mivel nincsenek meg a szükséges tulajdonságai ehhez a feladathoz; ebből a szempontból tehát elmarad a hagyományos téglától.

Környezetvédelmi szempontból a létrehozott anyag kibocsátása csak harmada az üvegtéglák szén-dioxid-kibocsátásának, de még mindig nem negatív a szén-dioxid-egyensúlya, tehát csak részleges sikernek tekinthető.

Gazdasági szempontból az anyag költséghatékonyabb, mint a hagyományos téglázat, ezért ez egy javulás az építőiparban, még akkor is, ha nem veszi figyelembe a pozitív környezeti hatást.

## Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Sushant M.: *Green Building Materials Market by Product Type (Exterior Products, Interior Products, Building Systems, Solar Products, and Others) and Application (Residential Buildings and Non-Residential Buildings): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2030s*. Allied Market Research, (2022).
- [2] Aydogan H., Hirz M. et al.: *The use and future of biofuels*. International Journal of Social Sciences (2014).
- [3] US Department of Energy, Guide to Home Insulation. Energy Efficiency and Renewable Energy, [https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide\\_to\\_home\\_insulation.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide_to_home_insulation.pdf)
- [4] Jiang Y. et al.: *Cell wall microstructure, pore size distribution and absolute density of hemp shiv*. The Royal Society Publishing, (2018).
- [5] Nguyen T., Picandet V. et al.: *Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete*. European Journal of Environment and Civil Engineering, (2010).
- [6] Netea A., Manea D., et al.: *Materiale de Constructii*. Chimie. UTPress (2019).
- [7] Kavitha S.: *Evaluation of CO2 emissions for green concrete with high volume slag, recycled aggregate, recycled water to build eco environment*. International Journal of Civil Engineering and Technology, (2017).
- [8] European Environment Agency, Jeronen Kuenen, et al., *Lime Production. Lime. Manufacture of cement, lime and plaster*. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016.
- [9] Scrucca F., Ingrao C., et al.: *Energy and carbon footprint assessment of production of hemp hurds for application in buildings*. Environment Assessment Review, 84. (2020).
- [10] Henning Larsen: *Recycled Bricks Reduces CO2 Emissions Enormously*. Henninglarsen.com (2017).



# A maximális hézag meghatározása lézeres hegesztéshez

## Determination of Maximal Gap for Laser Welding

Nagy Balázs,<sup>1</sup> Kovács Tünde Anna<sup>2</sup>

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék  
<sup>1</sup> [nagy.balazs@bgk.uni-obuda.hu](mailto:nagy.balazs@bgk.uni-obuda.hu)

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

### Abstract

Nowadays laser welding is widely used in industrial applications. Often, steel sheets are welded without welding material by using this process. The research aims to determine the maximal gap size and the related welding parameters for the laser welding of a 3 mm thick steel sheet of S235J2 steel grade. During welding, a joint gap may occur due to inadequate edge preparation, which must be considered during the design of the technology. The result of the experiments is that using the Trumpf TLF 5000 turbo-type carbon dioxide laser of 4.5 kW power, 3000 mm/min welding speed, with a focus the maximal gap size is 0.10 mm, while at 2000 (mm/min) welding speed, with 5 mm above focus the maximal gap size is 0.27 mm which can be welded with acceptable seam quality.

**Keywords:** *unalloyed steel, laser welding, welded joint, joint gap.*

### Összefoglalás

A lézeres hegesztést napjainkban igen elterjedten alkalmazzák az iparban. Számos esetben acéllemezeket hegesztőanyag nélkül hegesztenek össze ezzel az eljárással. A kutatás célja a maximális hézagot és a hozzá tartozó hegesztési paramétereket meghatározni S235J2 acélminőségű 3 mm vastagságú acéllemez lézeres hegesztéséhez. A hegesztésnél a nem megfelelő él előkészítés miatt adódhat hézag, amit a technológia tervezése során figyelembe kell venni. A kísérletek eredménye: a Trumpf TLF 5000 turbo típusú, szén-dioxid-lézer alkalmazásával, 4,5 kW teljesítmény, 3000 mm/min hegesztési sebesség, fókuszban hegesztve 0,10 mm rés, míg 2000 mm/min hegesztési sebesség, +5 mm fókusztolással 0,27 mm rés hegeszthető át elfogadható varratminőséggel.

**Kulcsszavak:** *S235J2, lézeres hegesztés, hegesztett kötés, illesztési hézag.*

## 1. Bevezetés

Az 1970-es években piacra került lézeres megmunkálórendszerek szélesebb technológiai sávon nyújtottak előnyöket a meglévő gyártórendszerekhez képest, valamint teljesen új alkalmazási lehetőségeket nyitottak meg. A fejlődés ezen a téren folyamatos. Mára a lézeres technika a gazdasági és magánélet területét is elérte. Néhány példa: az autógyártás nélkülözhetetlen technológiai eleme (vágás, fúrás, hegesztés, edzés) [1, 2].

Az anyagmegmunkálásban használt teljesítménylézerek esetében a nyers lézernyaláb átmérőjét fókuszállással csökkentjük, hogy megfelelő

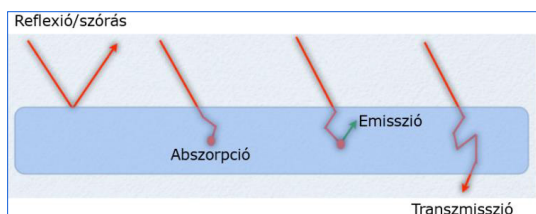
teljesítménysűrűség alakuljon ki a foltban, valamint, hogy a foltméret illeszkedjen a megmunkálási területhez. A fókusztolás lencsék és tükrök segítségével történhet. A folt mérete a fókusztól és az optika között közel lineárisan változik, így meghatározható, hogy mekkora a folt átmérője a fókusztól adott távolságban [3, 4]. „Amennyiben a munkadarab a fókusztávolságon kívül helyezkedik el, akkor pozitív fókusztolásról, ha azon belül, akkor negatív fókusztolásról beszélünk” [5].

A lézernyaláb egy része visszaverődhet a felületen, egy része bejuthat az anyagba. A bejutott hányad egy része elnyelődhet, ott hővé alakulhat.

Az el nem nyelt hányad keresztüljutva a munkadarabon kilép abból. E három kölcsönhatástípus együttesen ki kell hogy adja a kezdeti intenzitást. Az abszorpció során az intenzitás a mélység irányában exponenciálisan csökken. Ez a csökkenés függ az anyag összetételétől, szerkezetétől (kristályos vagy amorf) és a lézersugárzás hullámhosszától. A behatolási mélységet a felületi intenzitás  $1/e$  arányú csökkenése alapján határozzuk meg. Fémek esetén a lézertény áteresztése nulla, ezért a reflexió és az abszorpció összege megegyezik a kiinduló intenzitással. Tehát ha ismerjük az egyik adatot, akkor a másikat kiszámíthatjuk. Az **1. ábrán** látható a lehetséges kölcsönhatások közül az emisszió, aminek köszönhetjük a lézersugárzási jelenséget, a szilárdtestlézerek alapját képezi.

A fémek esetében az abszorpció mikrométeres vagy annál kisebb behatolási mélységben történik. A lézersugárzás az anyagban való elnyelődése során a felület közelében lévő szabadelektronokat gerjeszti, növelve a mozgási energiájukat. Az energiát az atommagok felé közvetíti, amelyek rezgésekben egyre nagyobb amplitúdóval rezegnek. Ennek következtében a felületi rétegekben a hőmérséklet növekszik. Az elnyelt energia hővezetéssel továbbterjed a mélyebb rétegekbe. A hőmérséklet növekedésével az abszorpció is növekszik. Az olvadáskor bekövetkező halmazállapot-változásnál megfigyelhető egy ugrásszerű növekedés, ami azt jelenti, hogy a szilárd és olvadék fázisban az anyag különböző mértékben nyeli el a lézersugárzást.

A lézersugárzás alkalmazási célja alapján hét csoportot szokás figyelembe venni: hétköznapi és szórakoztató, ipari és anyagmegmunkálási, orvosi, mérési és szabályozástechnikai, energetikai, harcászati, tudományos és kutatási. Az ipari és anyagmegmunkálási célú lézerberendezéseknél minden esetben a lézernyaláb teljesítményét (energiatartalmát) használják fel az anyagmegmunkálásra, amely az anyagban részben elnyelődik, hővé alakul, és különböző hatásokat eredményez (hevít, olvaszt, elpárologtat, plazmaállapotba visz, vegyületeket elbont, anyagátalakulást hoz létre) [4–6].



**1. ábra.** Fény-anyag kölcsönhatás lehetséges esetei

A lézereket négy fő csoportra szokás bontani az aktív lézerközegük halmazállapota szerint: gáz, szilárdtest, félvezető és festéklézerek.

### 1.1. Gázlézerek

A gázlézerek aktív közegként gázt használnak, például hélium-neon keveréket, argont (annak ionjait), excimer ( $\text{Ar}_2$ ,  $\text{F}_2$ ) / exciplex (nemesgáz és egy halogenid elem keveréke, pl.:  $\text{XeCl}$ ) lézerek gázkeverékeit, és általában alkalmazott szén-dioxidot. A gáz alkalmazásának előnyei, hogy homogén, viszonylag olcsó és könnyen utántölthető. Hátránya, ami a fizikai természetéből adódik, hogy kicsi sűrűségű és így nagy mennyiségű gázra van szükség ahhoz, hogy a populációinverzió bekövetkezzen [4, 5].

### 1.2. He-Ne lézer

A He-Ne lézer (1961 Bell Laboratories) az első olyan lézertípus, amellyel folytonos lézersugárzást tudtak megvalósítani. Az ipari gyakorlatban igen kedvelt, széles körben elterjedt lézertípus. Mindkét gáz egy üvegcsőben található, ahol a nyomás (néhány 100 Pa) kisebb, mint a légköri nyomás, mivel csak így lehet benne elektromos gázkisülést előidézni [4, 5].

### 1.3. Ar-ion lézer

Az Ar-ion lézerek (ahogyan a nemesgázion-lézerek is) a színeké látható és közeltéri UV-tartományában sugároznak. Ennél a lézerközeg kis nyomású argon, amelyben 30–50 A áramerősségű egyenáram hozza létre a populációinverziót. Az Ar-ion lézerek impulzusüzemben működnek, de alkalmazható gyűrűkiszülés is, hogy folytonos kimenő sugárzást érjenek el. Maximális teljesítménye a 100 W-os nagyságrendbe esik [4, 5].

### 1.4. Excimer- / exciolexlézer

Az excimer kifejezés klasszikus jelentése: egy gerjesztett, azonos atomokból álló (homopolár) molekula (pl.  $\text{Ar}_2$ ,  $\text{F}_2$ ). Manapság már elterjedtebb az egy nemesgáz és egy halogenid elem keveréke (heteropolár, pl.  $\text{XeCl}$ ), így a helyes kifejezés az exciplex (excited complex) lézer lenne, de a gyakorlatban ez nem terjedt el (szerencsére ezen anyagokat aktív lézerközegként használva hasonlóan működnek). Az excimerlézerekben általában valamilyen nemesgáz vagy nemesgáz és halogén alkot kétatomos molekulát. Az excimerlézerek alkalmazhatók szerves anyagok és biológiai szövetek hőmentes elpárologtatására (abláció), melyet a nagy fotonenergia és az UV-tartományra jellemző nagyfokú abszorpció tesz lehetővé. Emellett használják festéklézerek gerjesztésére

és anyagmegmunkálásra is, a chipgyártásban például a fotolitográfia fényforrásoként alkalmazzák [4, 5].

### 1.5. Szén-dioxid-lézer

A CO<sub>2</sub>-lézer a szén-dioxid-molekula vibrációs szintjei között működik, ez a legnagyobb teljesítményű gázlézer, amelynek határfoka is a legnagyobb (15–20%). Az aktív lézerműködés CO<sub>2</sub>-, N<sub>2</sub>-, He-vagy H<sub>2</sub>O-gőz körülbelül 1:1:8 arányú keveréke [4, 5].

### 1.6. Szilárdtestlézerek

A szilárdtestlézerek az utóbbi időben méltó ellenfelei lettek a CO<sub>2</sub>-lézereknek. A lézermédium ez esetben szilárd halmazállapotú anyagok (Nd:YAG, Nd:üveg, alexandrit, Ti:zafir stb.). Fontos kitékintés, hogy a kis teljesítményű félvezetőlézereket is a szilárdtestlézerekhez csoportosítják.

A YAG-alapú verzió terjedt el leginkább, amelynek legfontosabb fajtái:

- villanólámpával gerjesztett YAG-lézer,
- diódalézerrel gerjesztett YAG-lézer,
- YAG koronglézerek (hibrid) [1].

A lézeres hegesztés az elmúlt néhány évtizedben jelentősen fejlődött. Számos lézeres megmunkálási eljárás ismert és alkalmazott a mai ipari gyakorlatban. Jellemzően a lézeres vágás terjedt el, de a lézeres hegesztés is egyre inkább alkalmazott az ipar számos területén. A lézeres megmunkálások alkalmazási területeit az alkalmazott lézerek, az ezekkel elérhető teljesítmény és a lézer típusa is döntően meghatározzák [7–9].

Számos kutatási eredmény ismert a speciális anyagok kötéseinek lézeres hegesztéséről [8–10].

A kutatás célja annak a legnagyobb illesztési hézagnak a meghatározása, amikor a lézeres hegesztéssel a még megfelelő varrat létrehozható a Trumpf TLF 5000 turbo CO<sub>2</sub>-lézerrel.

## 2. Kísérletek

### 2.1. Felhasznált anyag

A kísérletet S235J2 minőségű acéllemezeken végeztük, kémiai összetételét az 1. táblázat tartalmazza. Ez az acélminőség jól hegeszthető, lézeres hegesztésre is megfelelő, mivel az alapanyag fe-

1. táblázat. Az S235J2 acél kémiai összetétele (m%).

Elemek	C	Si	Mn	P	S	Cu	Fe
%	<0,17	–	1,4	0,025	0,025	<0,55	Maradék

lületének reflektivitása kicsi, hővezető képessége 54 W/(m<sup>2</sup>·K), hőtágulása 1,2·10<sup>-5</sup> 1/°C.

A felhasznált acél mechanikai tulajdonságai R<sub>p0,2</sub> = 235 MPa, R<sub>m</sub> = 540 MPa, szakadási nyúlása minimum A ≥ 24 %, sűrűsége ρ = 7,85 kg/dm<sup>3</sup>. A kísérletekhez 3 mm vastagságú lemezeket használtunk fel.

### 2.2. Hegesztési kísérletek

A kísérleteket a Bay Zoltán alkalmazott kutatási közhasznú nonprofit Kft.-nél végeztük Trumpf TLF 5000 turbo típusú szén-dioxid-lézerrel, hullámhossz: 10,6 μm, 4,5 kW teljesítmény, öten-gyeges CNC-vezérlés. A berendezés munkatere 1600×1000×400 mm, alkalmas vágásra, fúrásra, hegesztésre és hőkezelésre is.

A hegesztési paraméterek meghatározásához hernyóvarratos próbahegesztéseket végeztünk. A hernyóvarratos hegesztés során nem alakítunk ki kötést egy másik darabbal (2. ábra).

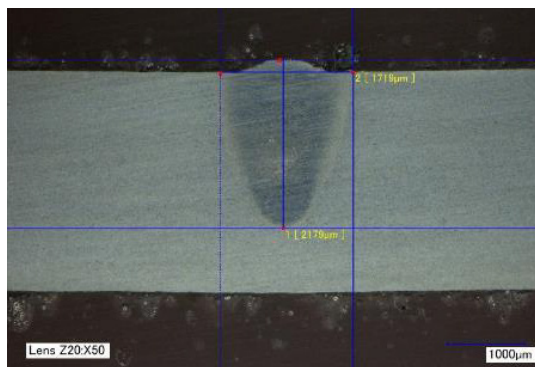
Az állandó paramétereket a 2. táblázat tartalmazza. A hegesztés során három különböző sebességet (500 mm/min, 2000 mm/min, 3000 mm/min), valamint három fókuszhelyzetet alkalmaztunk (0, +5, +10 mm), így kilenc hegesztést végeztünk.

A hernyóvarratos hegesztési kísérletek eredményeit értékeltük (beolvadási mélység, szemrevételezés), és ennek alapján határoztuk meg a további kísérletek paramétereit.

Az átheszthető hézag meghatározására a két

2. táblázat. Állandó hegesztési paraméterek

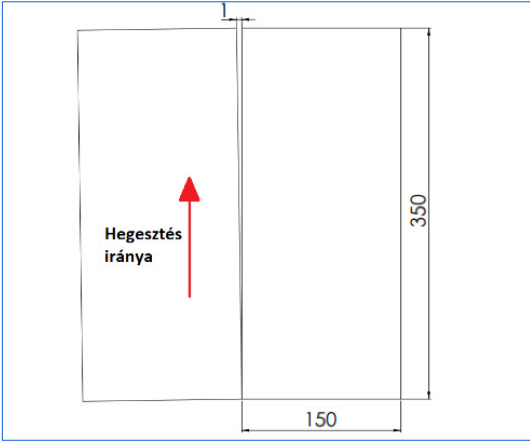
Kitöltés	Teljesítmény (W)	Fúvóka távolsága (mm)
CW (folyamatos üzem)	4500 (90%)	1
Munkagáz	Gáznymás (bar)	Munkagáz mennyisége (l/min)
Hélium 4,6	5	6



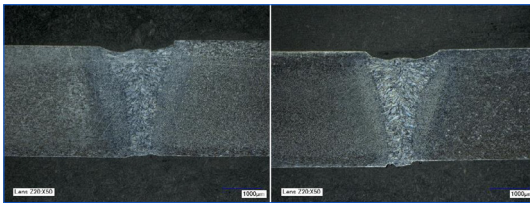
2. ábra. Egy hernyóvarrat metszete

**3. táblázat.** Kísérleti paraméterek

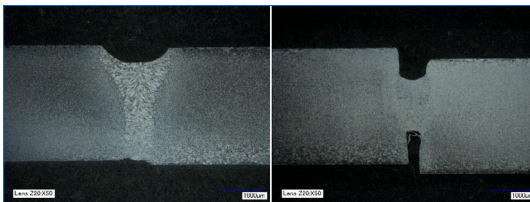
Minta jele	Fókuszeltolás (mm)	Teljesítmény (W)	Hegesztési sebesség (mm/min)
A	0	4500	3000
B	+5	4500	2000



**3. ábra.** Kísérleti elrendezés



**4. ábra.** Elfogadható varratkeresztmetszet; fókuszeltolás: 0 mm



**5. ábra.** Megfelelő varrat +5 (mm) fókuszeltolás

**4. táblázat.** Keménységértékek

Minta jele	Átlagos Keménység HV10		
	Alapanyag	Hőhatás-övezet	Varrat
A	130	150	190
B	130	160	200

lemezt a **3. ábra** szerinti elrendezéssel hegesztettük, ahol a lemezek egyik felét összeillesztettük, a másik oldalt 1 mm-re eltávolítottuk egymástól hézagolólemez segítségével.

A hegesztési paramétereket a **3. táblázat** foglalja össze.

**3. Eredmények**

A próbahegesztés végeztével megállapítottuk, hogy fókuszban hegesztve (0 mm) esetén, 0,1 mm hézag mellett, megfelelő varratot eredményez. A **4. ábrán** látható a 0,1 mm réstávolságú minta hegesztett varratának keresztmetszete, amit 4,5kW teljesítménnyel és 3000 mm/min hegesztési sebességgel hegesztettünk.

A két lemez összeolvadása megtörtént, a kötés kialakult.

Megállapítottuk, hogy +5mm fókuszeltolással 0,27 mm hézag volt áthegeszthető, megfelelő varratminőség mellett. Az **5. ábrán** látható a 0,27 mm réstávolságú minta hegesztett varratának keresztmetszete, amit 4,5 kW teljesítménnyel és 2000mm/min hegesztési sebességgel hegesztettünk.

Szakítóvizsgálatot végeztünk a varrat megfelelőségének ellenőrzésére. Megállapítottuk, hogy minden esetben a szakadás az alapanyagban következett be, ami a hegesztett kötés megfelelőségét erősíti meg (**6. ábra**).

Keménységméréssel is ellenőrizni akartuk a vizsgálati eredményeket, és megállapítottuk, hogy a keménység a varratban, a hőhatásövezetben és az alapanyagban a megengedett 380 HV10 alatti (**4. táblázat**).



**6. ábra.** Szakítóvizsgálati próbatestek

#### 4. Következtetések

A lemezélek vágás során nem minden esetben készülnek el pontosan, ezért a két lemez illesztésénél rés képződik, ami nem egyenletes. Emiatt mindenképpen fontos tudni azt, hogy mekkora hézag engedhető meg úgy, hogy a varrat még létrehozható maradjon hegesztőanyag hozzáadása nélküli lézersugaras hegesztéssel. Az elvégzett lézeres hegesztési kísérletek eredményei alapján kimondható, hogy a Trumpf TLF 5000 turbo típusú szén-dioxid-lézer alkalmazásával 4,5 kW teljesítmény, 3000 mm/min hegesztési sebesség, 0 mm fókusztolás, 0,1 mm hézag, míg 4,5 kW teljesítmény, 2000 mm/min hegesztési sebesség, +5 mm fókusztolás esetén 0,27 mm hézag hegeszthető át elfogadható varratminőséggel.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Buza G.: *Lézersugaras Technológiák I.*, 1. kiadás. Edutus Főiskola, Budapest, 2012.
- [2] Almási G., Erdélyi M., Fülöp József A., Hebling J., Horváth Z., Kovács Attila P., Rác B., Smausz Kolumbán T.: *Lézerfizika*. Elektronikus tananyag, (2013)  
<http://titan.physx.u-szeged.hu/~bubo/Lezerfizika/book.html#id296435> (letöltve: 2023. 09. 30.)
- [3] Markovits T.: *Korszerű lézersugaras technológiák*. Akadémiai Kiadó, 2018.
- [4] R. Crafer, Peter J. Oakley: *Laser processing in Manufacturing*. Springer Science & Business Media, 1992. 292.
- [5] IIW VI-1338r1-2022 Laser welding terms for ISO/TR 25901-5 (2022)
- [6] Bitay E.: *Lézeres felületkezelés és modellezés*. Műszaki Tudományos Füzetek, 4. 2007.  
<https://doi.org/10.36242/mtf-04>
- [7] Halász G.: *Lézer hibrid hegesztés*. 25. Jubileumi Hegesztési Konferencia, Budapest, 2010.
- [8] Xinmin Dong, Guofang Wang, Mohammad Ghaderi: *Experimental investigation of the effect of laser parameters on the weld bead shape and temperature distribution during dissimilar laser welding of stainless steel 308 and carbon steel St 37*. Infrared Physics & Technology, 116. (2021).  
<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103774>.
- [9] Kovacs, T.: *Laser welding process specification base on welding theories*. Procedia Manufacturing, 22. (2018), 147–153.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.023>.
- [10] Dobránszky, J., Lőrinc, Zs., Gyimesi, F., Szigethy, A., Bitay, E.: *Laser welding of lean duplex stainless steels and their dissimilar joints*. In: 8th European Stainless Steel and Duplex Stainless Steel Conference, Graz, Austria, April 28-30, 2015. 138–147.





## Részecskeerősítésű nyílt cellás fémhabok

## Particle Reinforced, Open Cell Metal Foams

Szovák Benedek,<sup>1,2,a</sup> Maróti János Endre,<sup>1,2,b</sup> Orbulov Imre Norbert<sup>1,2,c</sup>

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

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

<sup>a</sup> [szovak.benedek@edu.bme.hu](mailto:szovak.benedek@edu.bme.hu), <sup>b</sup> [maroti.janos.endre@gpk.bme.hu](mailto:maroti.janos.endre@gpk.bme.hu), <sup>c</sup> [orbulov.imre.norbert@gpk.bme.hu](mailto:orbulov.imre.norbert@gpk.bme.hu)

### Abstract

Salt replicated metal matrix foams are cellular materials with interconnected cells. These materials have some highly specific mechanical properties. They are capable of absorbing high amount of energy during compression. The main goal of this study was to increase these mechanical properties without drastically increasing density with the application of ceramic particles as reinforcing material. In this research salt-replicated metal foams with particle reinforced cell walls were successfully created with pressure infiltration. The energy absorption capacity, the plateau stress and in some cases the specific values were increased approximately by 10 % to 41 % by particle reinforcement.

**Keywords:** *metallic foam, open cell foam, reinforcement material.*

### Összefoglalás

A nyílt cellás fémhabok olyan cellás szerkezetű anyagok, amelyeken belül a cellák összeérnek. Ezeknek az anyagoknak egyes, a sűrűsége fajlagos mechanikai tulajdonságai kiválóak. Nagy mennyiségű energiát képesek elnyelni alakváltozáskor. A kutatás során sikeresen állítottunk elő cellaéleiben részecskével erősített nyílt cellás fémhabot nyomásos infiltrálással. A mechanikai vizsgálatok eredményeiből látható, hogy a kerámia erősítőanyag 10% és 41% közötti értékkel növelte az elnyelt energia mennyiségét és a platófeszültséget, valamint egyes esetekben a sűrűséggel normál platófeszültséget és az elnyelt energia mennyiségét.

**Kulcsszavak:** *fémhab, nyílt cellás hab, erősítőanyag.*

### 1. Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben az anyagtudomány egyik fő iránya a mérnöki anyagok tömeggel normált mechanikai tulajdonságainak optimalizálása volt.

Ennek egyik irányzata a tömeg, illetve a sűrűség csökkentése, amely a cellás szerkezetű anyagok, például fémhabok alkalmazásához vezetett [1]. Ezek az anyagok kis sűrűségűek, és emellett nagy az energiaelnyelő képességük [2]. A fémhabokat cellaszerkezetük alapján három fő csoportba sorolják, eszerint lehetnek: zárt cellás szerkezetű habok [2], nyílt cellás szerkezetű habok [2, 3] és szintaktikus habok [4–7].

Másik lehetőség a mechanikai tulajdonságok

javítása a tömeg jelentős növelésének elkerülése mellett. Ilyen anyagok a kompozitok, ahol egy kis sűrűségű, kis szilárdságú mátrixanyagba, például alumíniumötvözetbe ágyaznak kis mennyiségű, nagy szilárdságú erősítőanyagot. Ezek az erősítőanyagok lehetnek részecskék, például alumínium-oxid vagy szilícium-karbid vagy szálak [8–11].

A két módszer kombinálására korlátozott mennyiségű irodalmi forrás áll rendelkezésre. Ezekben az irodalmi forrásokban szemcsés kerámia erősítőanyagot alkalmaztak szintaktikus alumíniumhabok mátrixanyagának megerősítésére [12, 13]. A kutatások során megállapították, hogy a kerámia erősítőanyag növeli a fémhabok nyomószilárdságát, azonban csökkenti a platófeszültséget

és az 50% alakváltozásig elnyelt energiát. Ebből kifolyólag a kerámia erősítőanyag alkalmazása csak bizonyos esetekben indokolt szintaktikus fémhabok esetén [12, 13].

Ebben a kutatásban cellaélekben kerámiarészecske-erősítésű, nyílt cellás alumíniumhabokat készítettünk, és azt vizsgáltuk, hogy az erősítőanyag milyen hatást fejt ki a fémhab mechanikai tulajdonságaira.

## 2. Anyagok és módszerek

### 2.1. Felhasznált anyagok

Mátrixanyagként Al99,5 (ENAW-1050A) alumíniumot alkalmaztunk, anyagösszetétele (tömeg%): Al: 99,68; Si: 0,16; Fe: 0,1; Cu: 0,05; egyéb: 0,01. A mérést Zeiss EVO MA 10 típusú pásztázó elektronmikroszkópon végeztük, és 4 különböző mérés átlagaként állt elő.

Cellaképző anyagként sötét választottunk kis ára és könnyű elérhetősége miatt. Szitarsorral történő osztályozást követően 2,6–3 mm-es mérettartományba eső szemcséket használtunk, a cellaképző anyagról sztereomikroszkóppal készített kép az 1. ábrán látható. Erősítőanyagként 0,35–0,60 mm névleges méretű alumínium-oxidot és szilícium-karbidot adagoltunk (1. ábra b, c), a mátrixanyag térfogatának 20%-nyi térfogatban a cellaképző anyaghoz. Az erősítőanyagokat a Granit Csiszolószerszám Kft.-től [14] szereztük be.

A mikroszkópi képek alapján a cellaképző anyag  $2,73 \pm 0,04$  mm átlagos szemcseméretű, az erősítőanyagok méreteit az 1. táblázatban foglaltuk össze.

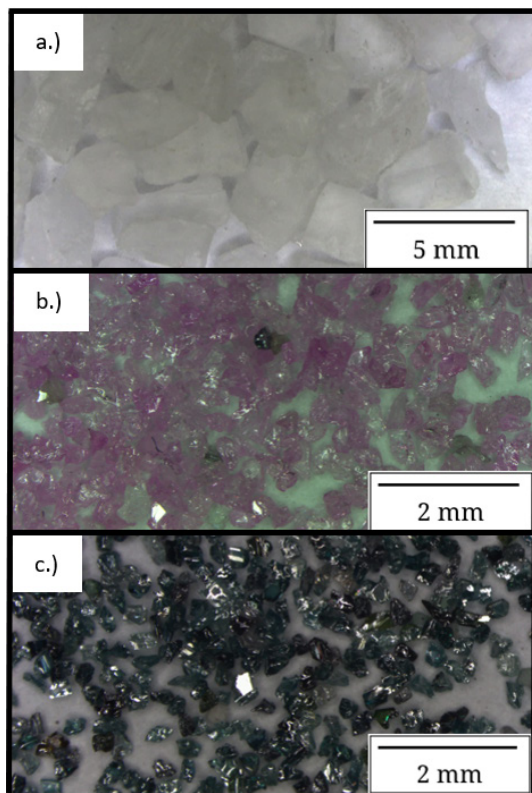
### 2.2. Felhasznált módszerek

A mintákat nyomásos infiltrálással vákuumkémencében állítottuk elő.

A cellaképző- és erősítőanyagokat kézi keveréssel elegyítettük, amíg szemrevételezés alapján megfelelőnek találtuk a keveredést. Az így elkészült keverékeket Due-Ci Electronic N-77 grafit spray-vel kezelt,  $60 \times 60 \times 300$  mm befoglaló méretű, 2 mm falvastagságú, S235J acélból készült tégelyekbe töltöttük egymás tetejére, egymástól papír elválasztóval elválasztva, amely az infiltrálás közben kiég. Az összeállítást felülről 1.4301 acélhálós zártuk le, hogy megakadályozzuk a cellaképző- és az erősítőanyag ömledékbe történő felúszását infiltrálás közben. Az acélháló tetejére 2 mm vastag, alumínium-oxid kerámiaszálas paplant helyeztünk. A tégelyekbe behelyeztük a mátrixanyagot. Az összeállításról készült modell az 3. ábrán mutatjuk be.

1. táblázat. A felhasznált erősítőanyagok névleges és mért szemcseméretei

Erősítőanyag	Gyártó által megadott mérettartomány (mm)	Mért szemcseméret (mm)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,35–0,60	0,52 ± 0,07
SiC	0,35–0,60	0,42 ± 0,06



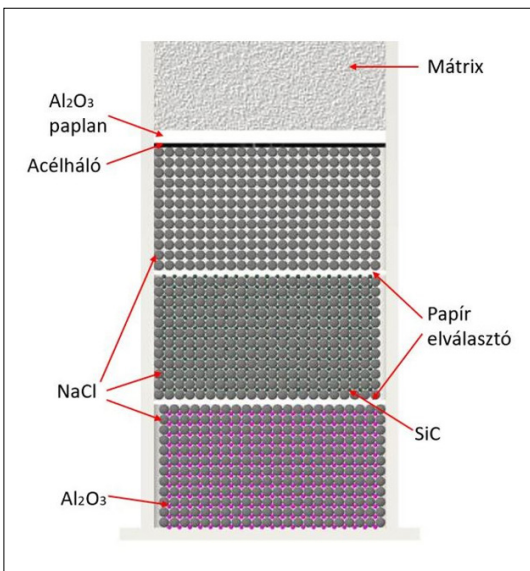
1. ábra. a) Cellaképző anyag, b) 0,35–0,60 mm szemcseméretű, alumínium-oxid erősítőanyag és c) 0,35–0,60 mm névleges méretű szilícium-karbid erősítőanyag sztereomikroszkópos képe



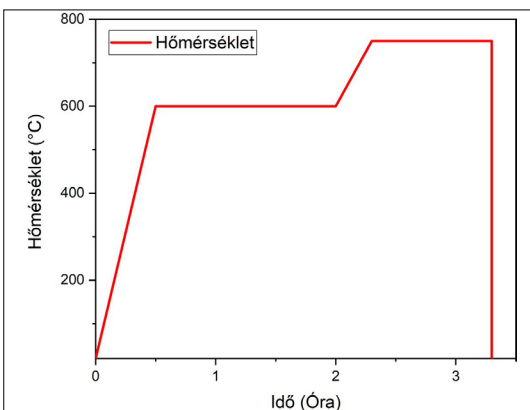
2. ábra. A kimunkált próbatestekről készült kép (balról jobbra Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> erősítésű, nyílt cellás fémhab, SiC részecskével erősített, nyílt cellás fémhab, erősítés nélküli, nyílt cellás fémhab)

Az elkészült összeállítást vákuumkemencében melegítettük elő 600 °C-ra és 1,5 órán keresztül hőn tartottuk a vákuum felépülése alatt, a kemencében lévő vákuum nagyságrendje  $10^{-4}$  Pa. Ezután 750 °C-ra hevítettük a kemencét, és 1 órán át hőn tartottuk, majd 5 bar nyomású argongázzal, 5 s-on keresztül elvégeztük az infiltrálást. Az infiltrálási hőmérséklet-idő diagramját a **4. ábra** mutatja.

Az elkészült darabot levegőn hűtöttük, majd a szobahőmérséklet elérése után kivágtuk a tégelyből. A próbatesteket Struers Discotom-10 típusú vágógépen vágtuk ki a teljes tömbből. A darabból  $20 \times 20 \times 30$  mm befoglaló méretű próbatesteket munkáltunk ki, ezeket a **2. ábra** mutatja be. Első-



**3. ábra.** A gyártás során használt összeállítás modellje



**4. ábra.** A hőmérséklet elvi változása az idő függvényében

ként a munkadarabokat vízben áztattuk 72 óráig, folyamatos közegáram mellett a cellaképző anyag kioldása, így a nyílt cellás szerkezet kialakulása végett. Az elkészült próbatestek közül a vizuális vizsgálatra szánt darabokat P80-tól P2500-ig egyenletes eloszlásban szilícium-karbid szemcsés csiszolópapírokkal csiszoltuk, majd 3  $\mu\text{m}$ -es gyémántszuszpenzióval políroztuk. A vizsgálatokat Olympus PMG-3 fémmikroszkóppal végeztük.

A mechanikai tulajdonságok meghatározására az ISO 13314:2011 szabvány [15] szerinti nyomóvizsgálatokat végeztünk. A vizsgálatokat MTS 810 típusú univerzális anyagvizsgáló gépen, 250kN-os erőmérőcellával végeztük. A kvázi statikus, egytengelyű nyomóvizsgálatot 3 mm/min keresztfejsebességgel legalább 50%-os mérnöki alakváltozásig végeztük. A nyomólapok és a próbatestek azokkal érintkező felületei közé 0,3 mm vastag Kolofol teflonfóliát tettünk szilárd kenésnek a súrlódás csökkentése érdekében.

## 3. Eredmények

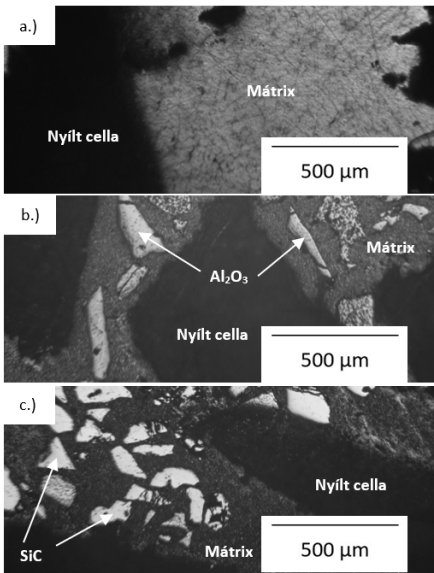
### 3.1. Mikroszkópos vizsgálat

A mikroszerkezeti vizsgálatok közben készült fémmikroszkópos felvételek az **5. ábrán** láthatóak.

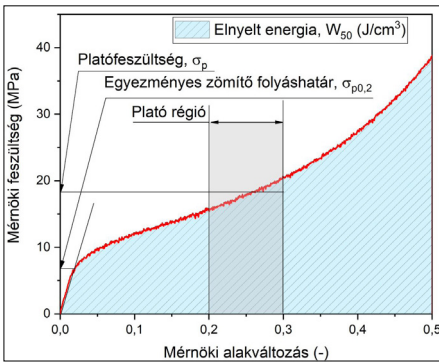
A mikroszerkezeti vizsgálatokból kiderül, hogy a mátrix (jelen esetben a cellafalak anyaga) és az erősítőanyag között jó kapcsolat alakult ki, nagyméretű porozitásokat és felületi hibákat, kiválasztásokat nem tapasztaltunk. Ebből az is következik, hogy az eljárás során megfelelő mértékben elosztható az erősítőanyag a cellaképző anyag szemcséi között. Az is jól látható a képeken, hogy a só jól kioldódott, a nyílt cellás szerkezet kialakult. Ezek alapján elmondhatjuk, hogy a nyomásos infiltrálás alkalmas részecskeerősítésű, nyílt cellás fémhabok készítésére.

### 3.2. Mechanikai vizsgálat

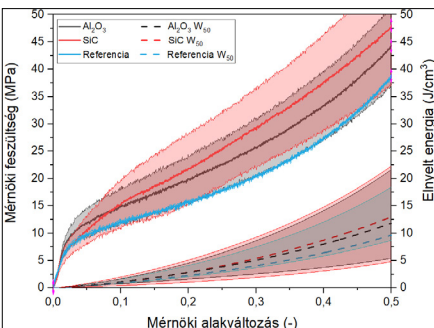
A vizsgálatok során erő-keresztfej-elmozdulás adatpárokat kaptunk. Ezekből a próbatestek kezdeti keresztmetszetének és magasságának felhasználásával mérnöki feszültség-mérnöki alakváltozás diagramokat készítettünk. Ezeken a diagramokon vizsgáltuk a mechanikai tulajdonságokat és azok sűrűséggel normált megfelelőit („f” kiegészítőindex). Ezek a következők: egyezményes nyomási folyáshatár ( $\sigma_{p0,2}$ ,  $\sigma_{fp11}$ ), ami a 0,2% mérnöki alakváltozáshoz tartozó feszültségérték, a platófeszültség ( $\sigma_{pl}$ ,  $\sigma_{fpl}$ ), amiként a 20% és 30% közti átlagos feszültségértéket határoztuk meg, és az 50% alakváltozásig egységnyi térfogat-



5. ábra. a) Erősítetlen, nyílt cellás fémháb (referencia), részecskeerősítésű, nyílt cellás fémhábok: b)  $Al_2O_3$ , c) SiC (az ábrán nincs minden cella, mátrixanyag és erősítőanyag feltüntetve)



6. ábra. A vizsgált mechanikai tulajdonságok értelmezése



7. ábra. A nyomófeszültség és az 50% alakváltozásig egységnyi térfogatban elnyelt energia az alakváltozás függvényében

ban elnyelt energia ( $W_{50}$ ,  $W_{f50}$ ), ami a görbe alatti terület az 50%-os alakváltozási határig. Ezeket a mechanikai tulajdonságokat mutatja a 6. ábra.

A kutatásunk során típusonként három típusonként három próbatest kiátlagolt nyomógörbéit és az alakváltozás során egységnyi térfogatban elnyelt energia változását mutatja a 7. ábra az alakváltozás függvényében.

Elsőként az egyes próbatestek sűrűségét számoltuk ki.

A legfontosabb mechanikai tulajdonságok eredményeit a 2. táblázatban foglaltuk össze.

A sűrűségek  $Al_2O_3$  esetében 36%-ot, SiC használatával 19%-ot növekedtek a referencia fémhábhoz képest.

A további eredmények összehasonlításakor láthatjuk, hogy az erősítőanyagok alkalmazása növeli a platófeszültséget,  $Al_2O_3$  erősítőanyag esetén 26%-kal, míg SiC esetén 41%-kal, és ugyancsak növeli az 50%-os alakváltozásig elnyelt energiát rendre 24%-kal és 36%-kal.

A trendet az egyezményes folyáshatár törli meg, ahol az  $Al_2O_3$  esetében 27%-os növekedést tapasztalunk, azonban szilícium-karbid erősítőanyag használata mellett 11%-os csökkenés látható.

A sűrűséggel fajlagosított mechanikai mérőszámokat is megvizsgálva már nem ennyire egyértelműen pozitívak az erősítőanyag használatának hatásai. A platófeszültség és elnyelt energia esetén a SiC-erősítőanyag használatánál 13% és 10%-kal nőttek, azonban  $Al_2O_3$ -részecskés erősítésnél mindkét mérőszám csökkent 8%-kal, illetve 10%-kal.

2. táblázat. A próbatestek fő mechanikai tulajdonságainak átlagértékei és szórásai

	$\sigma_{pl1}$ (MPa)	$\sigma_{pl}$ (MPa)	$W_{50}$ (J/cm <sup>3</sup> )
Ref.	6,40 ± 0,12	17,91 ± 0,19	9,66 ± 0,11
$Al_2O_3$	8,18 ± 0,52	22,93 ± 4,19	12 ± 97
SiC	5,78 ± 0,94	25,76 ± 6,18	13 ± 87
	$\sigma_{fpl1}$ (MPa*cm <sup>3</sup> /g)	$\sigma_{fpl}$ (MPa*cm <sup>3</sup> /g)	$W_{f50}$ (J/g)
Ref.	5,40 ± 0,14	15,11 ± 0,16	8,15 ± 0,08
$Al_2O_3$	5,15 ± 0,27	14,08 ± 1,45	7,40 ± 0,63
SiC	3,98 ± 0,39	17,46 ± 2,81	8,94 ± 1,25
	Sűrűség (g/cm <sup>3</sup> )		
Ref.	1,18 ± 0,01		
$Al_2O_3$	1,60 ± 0,12		
SiC	1,43 ± 0,11		

A sűrűséggel fajlagosított egyezményes zömítőhatár esetében, mindkét típusú erősítőanyag használatánál csökkenést tapasztaltunk, átlagosan 21%-kal.

Elmondható, hogy a szilícium-karbid mind a platófeszültség, mind az elnyelt energia esetén (és ezek fajlagos párjaiban is) növeli ezeket a tulajdonságokat. Egyedül az egyezményes nyomási folyáshatár és a fajlagos egyezményes nyomási folyáshatár esetében nem javított a referenciamintához képest.

#### 4. Következtetések

A kutatás során a következő következtetéseket sikerült levonni:

- A nyomásos infiltrálás alkalmas eljárás mátrix anyagában erősített nyílt cellás fémhabok gyártására.
- Az  $Al_2O_3$  erősítőanyag használata növelte az összes mérőszámot, azonban a fajlagos esetekben minden mérőszám esetén csökkentek az értékek a referenciamintához képest.
- Szilícium-karbid erősítőanyag esetében az egyezményes nyomási folyáshatárt és a fajlagos egyezményes nyomási folyáshatárt kivéve minden esetben jobbnak bizonyult a nyitott cellás fémhab vizsgált tulajdonsága, mint az erősítés nélküli nyílt cellás fémhabé.
- A vizsgált erősítőanyagok közül a szilícium-karbid alkalmazása bizonyult a legelőnyösebbnek.

#### Köszönetnyilvánítás

A bemutatott kutatás a BME-NVA-02. számú projekt részeként az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatással, a TKP2021 pályázati program finanszírozásában valósult meg, valamint a kutatást támogatta az NKFH Alap (TKP2020 IES, tsz: BME-IE-NAT; TKP2020 NC, tsz: BME-NCS) az Innovációs és Technológiai Minisztérium vezetése alatt. Ezt a munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH), támogatta az OTKA-FK\_21 138505 támogatási szerződés keretében.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kádár Cs., Kenesi P.: *Napjaink korszerű anyagai: a fémhabok*. Fizikai Szemle, 7-8. (2008) 279–281.
- [2] Hangai Y., Ando M., Ohashi M., Amagai K., Suzuki R., Matsubara M., Yoshikawa N.: *Compressive properties of two-layered aluminum foams with closed-cell and open-cell structures*. Materials Today Commun, 24. (2020) 101249. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101249>
- [3] San Marchi C., Mortensen A.: *Deformation of open-cell aluminum foam*. Acta Materialia, 49/19. (2001) 3959–3969. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00294-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00294-4)
- [4] Santa Maria J. A., Schultz B. F., Ferguson J. B., Rohatgi P. K.: *Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> syntactic foams - Part I: Effect of matrix strength and hollow sphere size on the quasi-static properties of Al-A206/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> syntactic foams*. Materials Science and Engineering: A, 582. (2013) 415–422. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.05.081>
- [5] Zukri A., Nazir R., Said K. N. M., Moayed H.: *Physical and mechanical properties of lightweight expanded clay aggregate (LECA)*. MATEC Web Conf 2018; 250. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825001016>
- [6] Kincses D. B., Károly D., Bukor C.: *Production and testing of syntactic metal foams with graded filler volume*. Materials Today. Proc., 45. (2020) 4225–8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.163>
- [7] Károly D., Iklódi Z., Kemény A., Kincses D. B., Orbulov I. N.: *Production and Functional Properties of Graded Al-Based Syntactic Metal Foams* 2022:1–12.
- [8] Dhanashekar M., Loganathan P., Ayyanar S., Mohan S. R., Sathish T.: *Mechanical and wear behaviour of AA6061/SiC composites fabricated by powder metallurgy method*. Materials Today. Proceedings, 21. (2019) 335–41. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.052>
- [9] Kumar N., Chittappa H. C., Ezhil Vannan S.: *Development of Aluminium-Nickel Coated Short Carbon Fiber Metal Matrix Composites*. Materials Today. Proc., 5. (2018) 11336–45. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.100>
- [10] Zamani NABN, Asif Iqbal AKM, Nuruzzaman DM.: *Fabrication and characterization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle reinforced aluminium matrix composite via powder metallurgy*. Materials Today. Proceedings, 29. (2019) 190–5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.541>
- [11] Zaiemyekeh Z., Liaghat G. H., Ahmadi H., Khan M. K., Razmkhah O.: *Effect of strain rate on deformation behavior of aluminum matrix composites with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles*. Materials Science and Engineering: A, 753. (2019) 276–84. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.052>
- [12] Maróti J. E., Szovák B., Orbulov I. N.: *Reinforced Matrix Syntactic Foams Filled with Ceramic Hollow Spheres*. Acta Mater. Transylvanica 5. (2022) 18–22. <https://doi.org/10.33924/amt-2022-01-05>
- [13] Károly D., Maróti J. E., Lolbert-Szabó J., Kemény A., Orbulov I. N.: *Production of syntactic metal foams reinforced in the matrix material*. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2022; 1246:012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1246/1/012014>
- [14] Granit Csiszolószerző Kft. <https://www.granit-net.hu/> (letöltve: 2023. július 8.).
- [15] ISO13314:2011 Mechanical testing of metals. Ductility testing. Compression test for porous and cellular metals.



## A sós víz hatása a bazaltszál erősítésű kompozit tulajdonságaira

### The Effect of Salt Water on the Properties of Basalt Fibre Reinforced Composites

Tamás-Bényei Péter<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> HUN-REN-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapest, Magyarország, [tamasp@pt.bme.hu](mailto:tamasp@pt.bme.hu)

<sup>2</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Budapest, Magyarország, [tamasp@pt.bme.hu](mailto:tamasp@pt.bme.hu)

---

#### Abstract

The use of natural or naturally derived reinforcing materials in polymer composites is increasing, thanks to the growing importance of sustainable economy and environmental consciousness. The most promising natural reinforcing material is basalt fibre, which has a very similar chemical structure to glass fibre, which is widely used. However, due to the difference in chemical structure, basalt fibre may be more resistant to more aggressive environments, such as seawater. In this research, the effect of salt water on basalt fibre and its composites was analysed. Unimpregnated basalt, glass and carbon fibre as well as impregnated composites with different concentrations of saltwater solutions were treated for different durations. The effect of salt water was studied by mechanical and morphological tests.

**Keywords:** *basalt fibre, salt water, ageing, polymer composite.*

#### Összefoglalás

A fenntartható gazdasági szemlélet és a környezettudatos gondolkodásmód folyamatos térhódításának köszönhetően a polimer kompozitokban is egyre nagyobb teret nyer a természetes vagy természetes eredetű erősítőanyagok alkalmazása. A természetes eredetű erősítőanyagok közül a bazaltszál tűnik a legígéretesebbnek, amely kémiai szerkezetét tekintve nagyon hasonló a nagy mennyiségben használt üvegszálhoz. A kémiai felépítés különbségének köszönhetően azonban a bazaltszál jobban ellenáll az agresszívabb környezetnek, mint például a tengervizes környezetnek. Kutatásom során elemeztem a sós víz bazaltszálra és belőle készülő kompozitokra gyakorolt hatását. Különböző koncentrációjú oldatokkal eltérő ideig kezeltem impregnálatlan bazalt-, üveg- és szénszálat, valamint impregnált kompozitokat is. A sós víz hatását mechanikai és morfológiai vizsgálatokkal tanulmányoztam.

**Kulcsszavak:** *bazaltszál, sós víz, öregítés, polimer kompozit.*

---

#### 1. Bevezetés

A nagy igénybevételnek kitett alkatrészek megalkotására a korszerű anyagtudomány kiváló anyagkombinációkat kínál. A szerkezeti anyagokat alapvetően három csoportra lehet bontani, amelyek közül az egyik a polimerek családja. Az anyagok egy különleges csoportja a polimer kompozitoké, amelyeket nagy fajlagos szilárdság és tervezhető anizotrópia jellemez. A polimer

kompozitok erősítőanyagból és mátrixanyagból állnak, amelyek közül az erősítőanyag felelős a teherviselés megvalósításáért.

Az erősítőanyag jellemzően szál formájú, anyagát tekintve pedig az üvegszál és a szénszál a leggyakrabban alkalmazottak. Napjainkban a környezettudatos gondolkodásmód és a fenntartható gazdasági szemlélet terjedése következtében egyre inkább előtérbe kerül a természetes vagy a természetes eredetű erősítőanyagok felhasználása is.

A polimer kompozitok egyik legigéretesebb természetes eredetű erősítőanyaga a bazaltszál.

A bazalt egy, a természetben sok helyütt megtalálható vulkanikus kőzet, amelynek kémiai összetétele nagyon hasonló az üvegszáléhoz, legfontosabb alkotóelemei a  $\text{SiO}_2$ , az  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , a CaO, az MgO, a FeO és a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [1].

A bazaltszál mechanikai tulajdonságai szintén az üvegszáléhoz hasonlóak, emellett nagy előnye, hogy természetes anyag, bioinert, nem okoz irritációt és környezetbarát is [2], emellett ellenáll az UV- és a nagy energiájú elektromágneses sugárzásnak is [3]. A bazaltszál kivételes ellenálló képessége kiterjed a kémiai ellenálló képességre is [4].

A jobb mechanikai jellemzőjű folytonos bazaltszál kétlépcsős szálhúzással állítható elő [5]. A bazaltszálak szakítószilárdságát a gyártástechnológia mellett számos további tényező befolyásolja, mint például a kémiai összetétel, a szálátmérő, a szálszerkezeti inhomogenitások is. A bazaltszál kevésbé érzékeny a szálöregedésre, mert a benne lévő vas-oxidok göcképzőként viselkedve finom és viszonylag homogén kristályos szerkezet kialakulását segítik elő [6].

A bazaltszál előnyös tulajdonságainak köszönhetően egyre szélesebb körű elterjedése várható különböző területeken, ahol agresszívabb környezeti igénybevétel érheti. A környezeti igénybevételek az alkalmazási területek szerint igen eltérőek lehetnek [3].

Több kutató már foglalkozott a tengervíz bazaltszálak kompozitok tulajdonságaira gyakorolt hatásának értékelésével [7], azonban az elemzések korántsem voltak teljes körűek.

Wei és társai [8] a tengervíz hatását vizsgálták az üveg- és bazaltszálak kompozitok tulajdonságaira. Kimutatták, hogy a bazaltszálak kompozit jobban ellenáll a tengervíznek, mint az üvegszálak kompozitok. Bonsu és társai monokompozit [9] és hibrid kompozit [10] formában elemezték az üveg- és a bazaltszál jellemzőinek változását rögzített oldatkonzentráció és eltérő tartási idő mellett. Kimutatták, hogy a mechanikai tulajdonságok csökkenését elsősorban a szál-mátrix adhézió jelentős romlása, valamint a víz lágyító hatása okozza.

Emellett Fourier-transzformációs, infravörös spektroszkópiával (FTIR-spektroszkópia) megvizsgálták a beágyazott szálak felületét kezelés előtt és 305 nap öregítés után. A vizsgálatok eredményei szerint a tengervíz kezelés megváltoztatja a szálak felületének kémiai összetételét.

Davies és társai [11] a bazaltszálak kompozitok különböző hőmérsékletű, sós vízben történő áztatás hatására létrejövő tulajdonságváltozását ele-

mezték statikus és ciklikus vizsgálatokkal. Kimutatták, hogy a bazaltszálak kompozitok hasonlóan viselkedtek, mint az üvegszálak. A rétegek közötti nyírószilárdság csökkenése mindkét esetben 20% körüli volt, amit a degradáció és a 1,5% körüli nedvességfelvétel okozott.

Kaybal és társai [12] a sós víz hatására létrejövő rétegelválást halloysit nanocső (HNT) hozzáadásával próbálták kompenzálni. Elemezték a kompozitokban az igénybevételek hatására létrejövő károsodási mechanizmusokat. Kimutatták, hogy a HNT korlátozta a nedvességfelvételt, ezáltal nagyobb maradó szilárdságot eredményezett a kompozitokban. Több kutató vizsgálta a tartási idő [13], a közeg hőmérsékletének hatását [14] a morfológiai és mechanikai jellemzőkre [15, 16], azonban nem elemezték a koncentráció hatását, továbbá nem foglalkoztak a mátrixanyag nélküli erősítőanyagok tulajdonságváltozásával.

Kutatásom során laboratóriumi körülmények között elemeztem a sós víz hatását a bazaltszálra és a bazaltszál szövet felhasználásával készülő, epoxigyanta mátrixú kompozitok tulajdonságaira. Referenciaként a leggyakrabban alkalmazott erősítőanyagokat (üvegszál, szénszál) és az ezek szöveteivel készült kompozitjait tekintettem, és ezek kezelését is végrehajtottam.

## 2. Felhasznált anyagok, módszerek és berendezések

Ebben a fejezetben foglaltam össze a kutatás során felhasznált anyagokat, a minták előállítására szolgáló eljárást, valamint a próbatestek vizsgálatához felhasznált vizsgálati módszereket és berendezéseket.

### 2.1. Felhasznált anyagok

A kutatásom során a vizsgálatokhoz a bazaltszál szövet mellett a két leggyakrabban alkalmazott erősítőanyagot, üvegszál- és szénszál szövetet használtam fel (1. táblázat). Az erősítőszövetek vaszonkötésűek voltak, és mindegyiket epoxigyantához felületkezelték.

A polimer kompozitok előállításához IpoX Chemicals Kft. által készített MR3009 típusú bisfenol-a típusú, általános célú lamináló epoxigyantát („A” komponens) alkalmaztam MH3120 típusú, aminos térhálósítóval („B” komponens). A mátrixanyag alapvető jellemzőit a 2. táblázat foglalja össze.

A kompozitlemezeket kézi laminálással készítettem el. A mátrixanyag komponenseinek tökéletes elegyedését kétlépcsős keveréssel biztosítottam. Az első lépésben a komponenseket 5000 1/perc

**1. táblázat.** A kísérleti minták erősítőanyagai

Anyag	Gyártó	Típus	Területi sűrűség
Bazalt-szál szövet	Basaltex (Belgium)	BAS 220 P	220 g/m <sup>2</sup>
Üvegszál szövet	UNIQUE textiles (Csehország)	UTE 220 P	220 g/m <sup>2</sup>
Szénszál szövet	SGL Group (Németország)	SIGRATEx C W200-PL1/1	200 g/m <sup>2</sup>

**2. táblázat.** A vizsgálatokhoz felhasznált erősítőanyagok

„A” komponens	„B” komponens	Keverék	
Dinamikai viszkozitás		Tömegarány	Gélesedési idő
2000 mPas	300 mPas	100 : 20	45 min

fordulatszámú, IKA RW 16 Basic típusú, száras keverővel 3 percig kevertem szobahőmérsékleten. Ezután a keveréket 2 percig pihentettem, majd megismételtem az első lépést. A laminálás során minden egyes réteg átimpregnálása után görgővel távolítottam el a szövetből a légbuborékokat és a felesleges gyantát is. A kompozitlemezek felépítését 6 réteg erősítőanyag felhasználásával állítottam elő. A gyártás során minden esetben a gyártó által javasolt 4 órás, 60 °C-on történő utótérhálósító hőkezelést alkalmaztam Heraeus UT20 típusú szárítószekrényben.

Az elkészített anyagokat a könnyebb azonosíthatóság érdekében rövidített elnevezéssel láttam el, ahol a GFEP az üveg-, a BFEP a bazalt-, a CFEP a szénszállal erősített, epoxigyanta alapú kompozitot jelenti.

**2.2. Vizsgálati módszerek és berendezések**

Az erősítőszövetek viselkedését MSZ EN ISO 13934-1:2013 szabvány szerinti sávszakító vizsgálatokkal elemeztem, Zwick Z020 típusú szakítógéppel. A vizsgálathoz használt sávok hossza 250 mm, szélessége 50 mm volt. A szövetek szakítószilárdságát és rugalmassági modulusát a sávot felépítő rovingok, valamint a rovingokat alkotó elemi szálak számának és átmérőjének, továbbá az erősítőszövet szakítóerejének ismeretében számítottam ki.

Szövetenként 10-10 mintát vizsgáltam szobahőmérsékleten. A kompozitok húzóvizsgálatát az MSZ EN ISO 527-4:2023 szabvány alapján, ZWICK Z020 típusú szakítógépen hajtottam végre 250

mm hosszú és 2×25 mm keresztmetszetű próbatetek felhasználásával. A szakításkor felvett erő-elmozdulás görbéből húzószilárdságot, szakadási nyúlást és húzó rugalmassági modulusot határoztam meg. A húzóvizsgálat során a befogási hossz 150 mm, a szakítási sebesség 2 mm/min volt. Az eredmények pontosabbá tételéhez a mérés során a nyúlás méréséhez videoextenzométert is használtam. Kompozitonként 5-5 próbatestet vizsgáltam szobahőmérsékleten.

A kompozitok szobahőmérsékletű, hárompontos hajlítóvizsgálatát az MSZ EN ISO 14125:1999 szabvány szerint, ZWICK Z020 típusú szakítógépen végeztem el. A mérésekhez alkalmazott, 2×10 mm keresztmetszetű próbatetek vizsgálata során 64 mm alátámasztási távolságot és 5 mm/min terhelési sebességet alkalmaztam. A próbateteket maximálisan 6,4 mm határlehlajlásig terheltem. Az erő-lehlajlás görbéből hajlítófeszültséget és hajlító rugalmassági modulusot számítottam. Kompozitonként 5-5 próbatestet vizsgáltam.

A kompozitok Charpy-féle ütővizsgálatát az MSZ EN ISO 179-2:2020 szabvány alapján végeztem el, CEAST Resil Impactor Junior típusú gép alkalmazásával, bemetszés nélküli, 2×10 mm keresztmetszetű próbatesten. Az alkalmazott ütési energia 25 J, a becsapódás sebessége 3,3 m/s, az alátámasztási távolság 80 mm volt. A mérés során a próbatest által elnyelt energiát regisztráltam, és ebből határoztam meg a Charpy-féle ütőszilárdságot. A méréseket kompozitmintánként legalább 5-5 próbatesten végeztem el szobahőmérsékleten.

A Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópiai (FTIR) méréseket Perkin Elmer Spectrum 400 típusú berendezésen hajtottam végre, reflexiós üzemmódban. A berendezésben található fényforrás a középtéri és a távöltéri IR-tartományban sugárzó, hosszú életű fényforrás, amely lehetővé teszi a vizsgálatokat a 4000–6500 cm<sup>-1</sup>, illetve 2500–15385 nm hullámhossztartományban.

Az ultraibolya (UV) spektroszkópiai vizsgálatokat Hewlett Packard 8452A típusú, diódasoros detektorral ellátott spektrométerrel végeztem abszorpciós üzemmódban. A berendezés 190–820 nm hullámhossztartományban üzemelő, látható UV-fényforrást használ, 2 nm-es felbontással.

A minták mikroszerkezet-vizsgálatát JEOL JSM-6380LA pásztázó elektronmikroszkóppal hajtottam végre. A vizsgálatok során a roncsolt próbatetek töretfelületéről készítettem felvételeket, amelyek alapján megállapítható a határfelületi adhézió minősége. A vizsgált felületeket a mérés előtt vezetőképes réteggel vontam be az elektrosztatikus feltöltődés elkerülése érdekében.

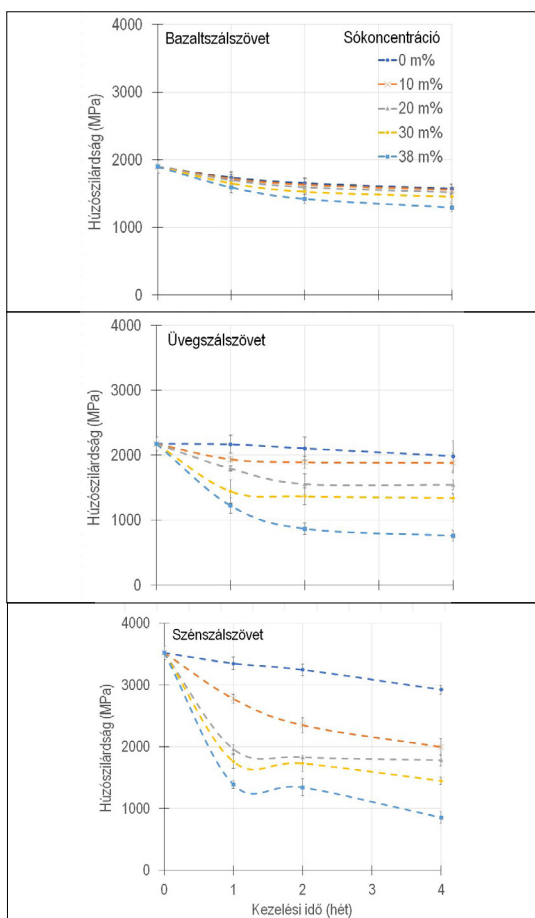


### 3. Kísérleti rész

Ebben a fejezetben foglaltam össze a kutatás kísérleti részében végrehajtott mérések eredményeit és következtetéseim.

#### 3.1. A sós víz hatása az erősítőanyagok jellemzőire

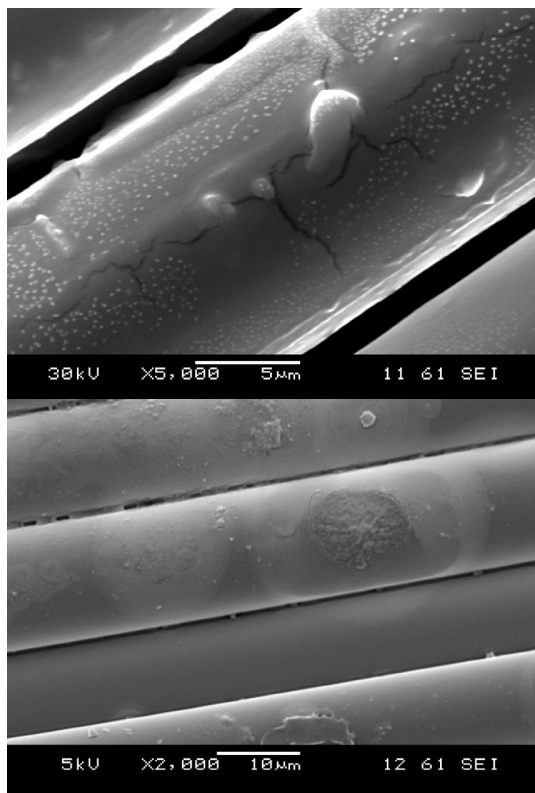
A sós víz okozta korrózió az off-shore szél-erőművek lapátjait is felépítő polimer kompozitok szempontjából is reális veszélyt jelent. A nedvesség már feltárt lágyító és adhéziót károsító hatása mellett egy esetleges sérülés esetén az erősítőszövet is érintkezhet a tenger vizével, ami így károsíthatja közvetlenül az erősítőszövetet is. Ennek a hatásnak a vizsgálatához tengervíz szimuláló, különböző koncentrációjú (0, 10, 20, 30, 38%) kezelőoldatokat készítettem, majd eltérő időtartamokig (1, 2, 4 hét) behelyeztem abba az erősítőszöveteket, valamint a kompozitokat.



1. ábra. A sós víz hatása az erősítőszövetek húzószilárdságára

A koncentráció állandó értéken tartása érdekében a kezelést zárt tartályban, fénytől elzárva végeztem. A telítési oldatkonzentrációjú oldattal (38%) történő kezelést az indokolta, hogy a szél-erőművek lapátjain lokálisan megnövekedhet a koncentráció. Minden vizsgálat előtt desztillált vízzel öblítettem le a minták felületét. A kezelés erősítőszövetekre gyakorolt hatását sávszakító vizsgálatokkal elemeztem, amelyek eredményét az 1. ábra foglalja össze. A sávszakító vizsgálat eredményei szerint minden egyes erősítőszövet húzószilárdsága folyamatosan csökkent az oldatkonzentráció és a kezelési idő növelésével. Ez a csökkenés a szénszál szövet esetén volt a legnagyobb (76%), amit az üvegszál szövet követett (65%), a legellenállóbbnak pedig a bazaltszál szövet bizonyult (32%).

A bazaltszál szövet esetében tapasztalható szilárdságromlást a sós víz és a bazaltszál szövet elemi szálai közötti kölcsönhatás okozza, amelynek bizonyítására készített pásztázó elektronmikroszkópi felvételeket a 2. ábra mutatja.



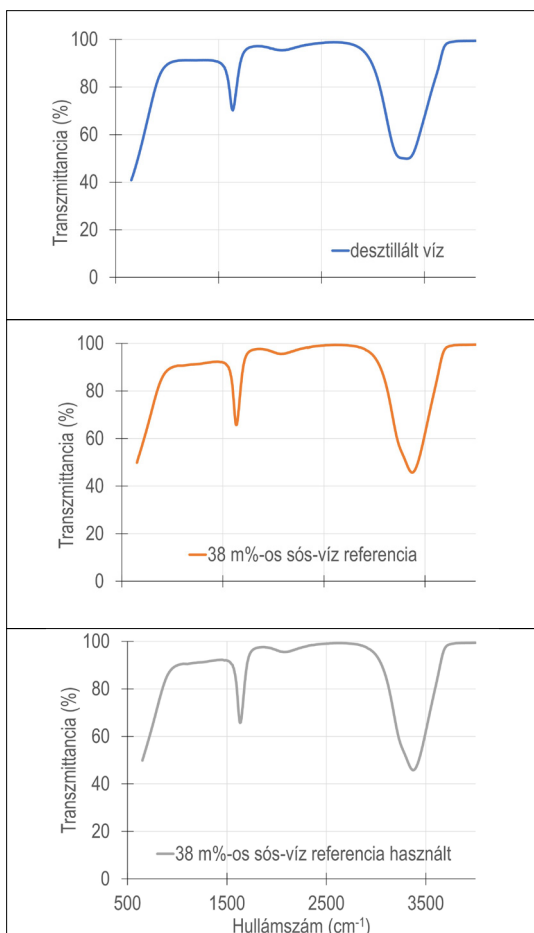
2. ábra. Az elemi bazaltszálak károsodása a sós vizet kezelés hatására; 38% koncentráció 4 hét (felső), 30% koncentráció 4 hét (alsó)

A felvételek tanúsága szerint a bazaltszál szövetet alkotó elemi szálak károsodnak, felületükön repedések, bemaródások figyelhetők meg.

A kezelés hatására valószínűsíthetően valamely összetevő kivált, kioldódott az elemi szálakból, aminek bizonyítására mintát vettem az oldatok készítéséhez használt desztillált vízből, valamint az elkészített, 38% koncentrációjú oldatból, amiben nem voltak erősítőanyagok, továbbá abból az oldatból is, amiben a bazaltszálak 4 hetet töltöttek.

A folyadékokat Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópiai vizsgálatnak vettem alá. Mintánként 3-3 mérést hajtottam végre, és az egyedi spektrumgörbék átlaggörbéit ábrázoltam (3. ábra).

Az eredmények alapján a különbség kizárólag a referenciaként használt desztillált víz és a 38% koncentrációjú sós vizes oldat között figyelhető



3. ábra. A Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópiai vizsgálatok eredménye

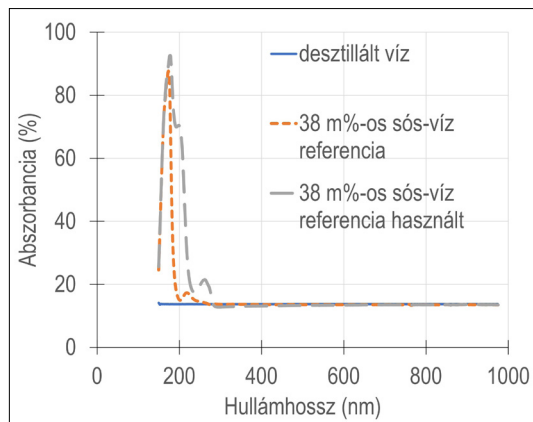
meg. A detektálható eltérés mindössze transzmittancia-változásban és nem hullámhossz-eltérésben nyilvánul meg. A két jellegzetes csúcs a vizes oldatokat jellemző karakterisztikus jel. Vélhetően a hullámhossztartomány korlátozza a kioldódó elemek azonosítását, ezért UV-spektroszkópiát alkalmaztam, amely kisebb hullámhossztartományban üzemel. Mintánként itt is 3-3 egyedi spektrumgörbe átlagát ábrázoltam (4. ábra).

A referenciaként vizsgált desztillált víz abszorbanciája elhanyagolható a 38%-os sós vizes oldathoz képest. A sós vizes oldatok esetében meghatározott jellemző hullámhosszokat a 3. táblázat foglalja össze. A szakirodalom alapján [17–19] a használt sós vizes oldat esetében látható 190–220 nm közötti értékek (199,76; 218,10) a nátrium és a kálium, míg a nagyobb csúcserték (262,62 nm) a vas és a vas-oxidra jellemző karakterisztikus csúcs tartományába esnek.

A spektroszkópiai vizsgálatok igazolták, hogy a bazaltszál szövet mechanikai tulajdonságai a sós vizes kezelés hatására történő kioldódás miatt csökkentek, amit a bazaltot felépítő vas, illetve vas-oxid sós vízzel történő kölcsönhatása okozott.

3. táblázat. A rögzített UV-spektrumok karakterisztikus csúcsai

Anyag	Hullámhossz-csúcserték (nm)		
	1.	2.	3.
38%-os sós víz, referencia	173,57	218,1	–
38%-os sós víz, használt	178,81	199,76	262,62



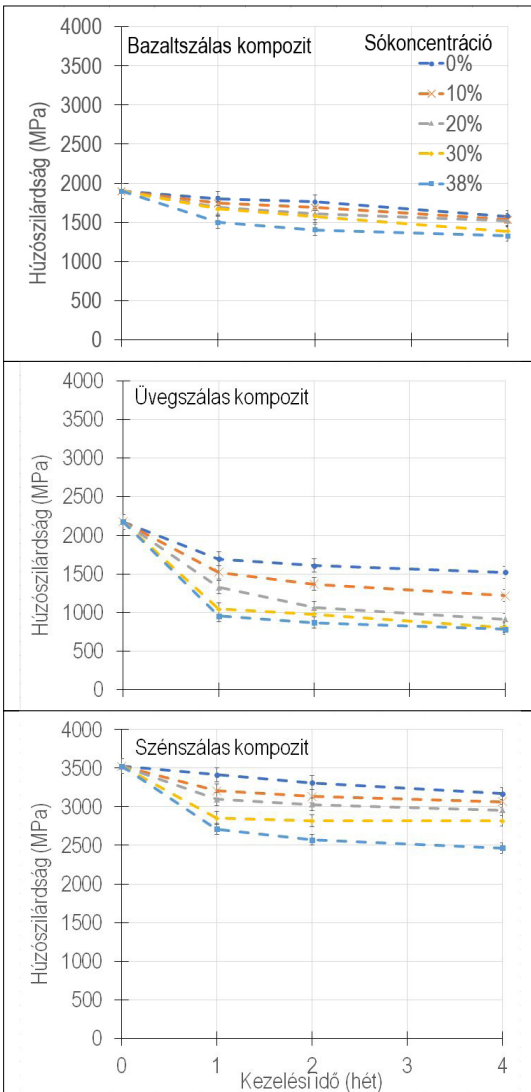
4. ábra. Az ultraviola spektroszkópiai vizsgálatok eredménye

### 3.2. A sós víz hatása a kompozitok jellemzőire

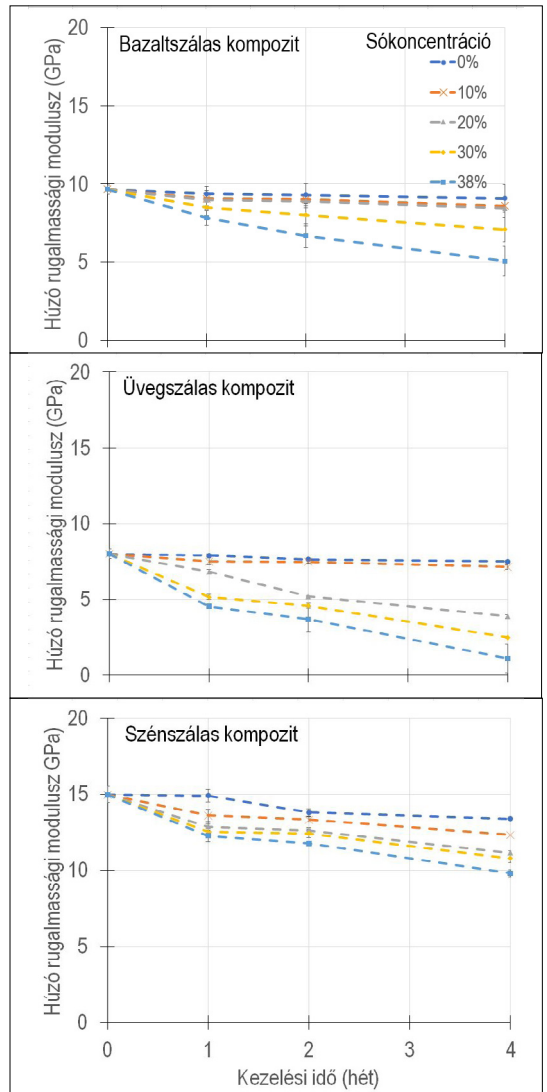
Az erősítőszövetek után húzó-, hárompontos hajlító és Charpy-vizsgálatokkal elemeztem a sós víz hatását a bazaltszálás mono- és hibridkompozitok mechanikai tulajdonságaira. A vágással kialakított próbatestek széleit viasszal zártam le, elkerülendő a sós víz közvetlen bejutását a kompozit anyagba. A húzóvizsgálatok eredményeit az **5. ábra** és a **6. ábra** mutatja.

A húzóvizsgálatok eredményei alapján a sós víz legkevésbé a bazaltszálás szövettel erősített kompozitot károsította, ami annak köszönhető, hogy

a bazaltszálás szövet jobban ellenáll a mátrixanyag mikropórusain és mikrorepedésein keresztül áthatoló sós víznek, ami a bazaltot felépítő fémes elemeknek a következménye. Az üvegszálás szövettel összehasonlítva a bazaltszálás szövet hozzávetőlegesen 30%-kal ellenállóbb. A bazalt- és a szén- szálás szövet eredményei szerint a referenciához képest nincs jelentős eltérés. A vizsgálatok alapján az üvegszálás szövet bazaltszálás szövettel történő helyettesítése sós vizes környezetben jelentős élettartam-növekedést, egyben költségcsökkenést is okozhat, tehát a bazaltszálás szövet felhasználása tengeri szélerőművekben pozitív hatással lehet a



**5. ábra.** A kompozitok szakítóvizsgálat során meghatározott húzószilárdsági értékei



**6. ábra.** A kompozitok szakítóvizsgálat során meghatározott húzó rugalmassági modulusz értékei

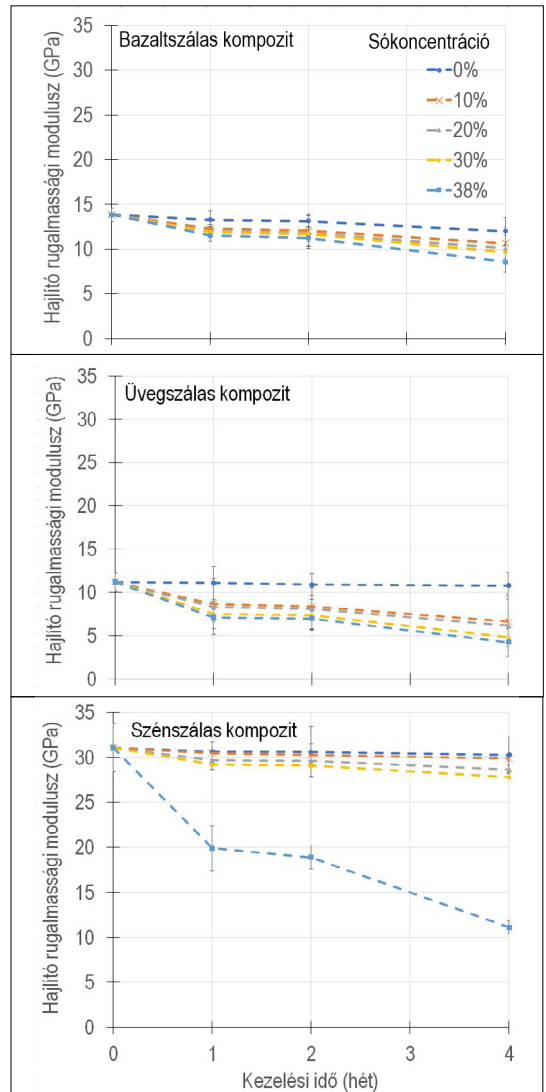
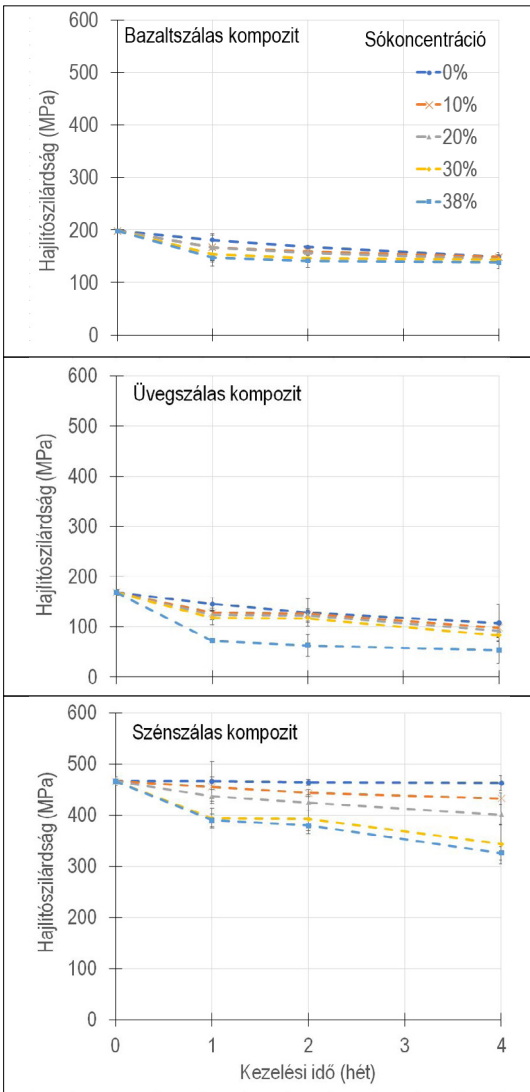
turbinalapátok élettartamára. A kompozitok hajlítóvizsgálat során meghatározott hajlítózilárdsági és hajlító rugalmassági modulusz értékeit a **7. ábra** és a **8. ábra** foglalja össze.

A húzóvizsgálat alapján meghatározott trend összhangban áll a hajlítóvizsgálat eredményeivel, a bazaltszál szövetrel erősített kompozitok – az üvegszál szövetrel erősítettekkel ellentétben – kevésbé bizonyultak érzékenynek a sós vizes kezeléssel szemben.

A bazaltszál szövet – az üvegszál szövethez képest – 36%-kal ellenállóbbnak bizonyult, a hajlítózilárdság és 26%-kal a hajlító rugalmassági

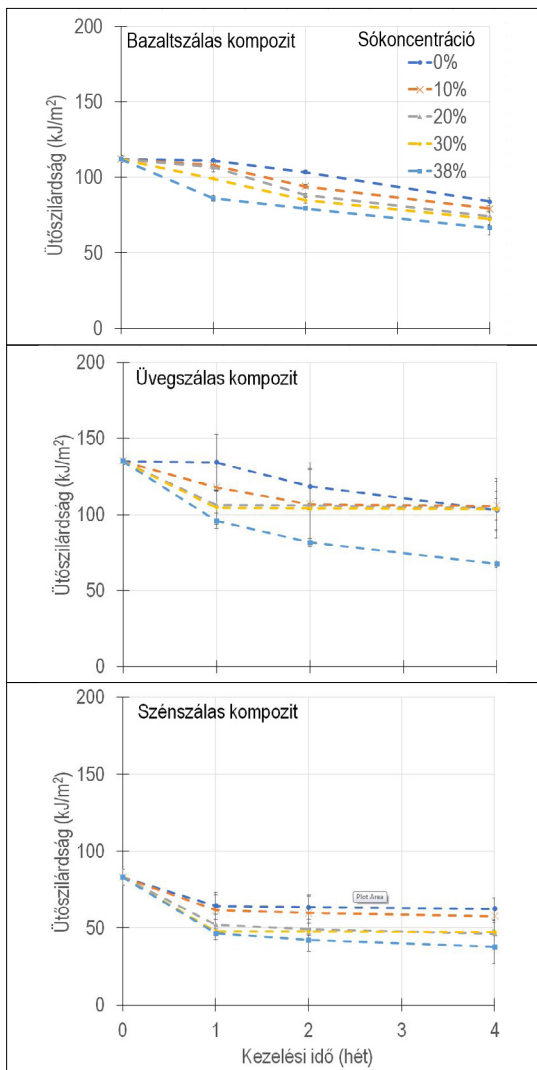
modulusz tekintetében, 4 hét kitéti idő elteltével. A hajlítóvizsgálatok eredményei alapján a bazaltszál szövet eredményesen alkalmazható, abban az esetben is, amikor a szerkezeti elemek hajlító igénybevételnek vannak kitéve.

Összegezve, az üvegszál szövet alkalmazása kiváltható bazaltszál szövetrel, mert vizsgálati eredményeim szerint jobban ellenáll a sós vizes környezetnek. A Charpy-féle ütővizsgálat eredményeit a **9. ábra** mutatja. A Charpy-vizsgálat eredményei is alátámasztják a szakító- és a hajlítóvizsgálatok eredményeit. A sós vizes kezelés hatására a mátrixanyag is degradálódott, vala-



7. ábra. A kompozitok hajlítóvizsgálat során meghatározott hajlítózilárdsági értékei

8. ábra. A kompozitok hajlítóvizsgálat során meghatározott hajlító rugalmassági modulusz értékei



9. ábra. A kompozitok útővizsgálat során meghatározott útőszilárdsági értékei

mint az erősítőanyagokat felépítő elemi szálak is, amit az üvegszál szövettel erősített kompozit 4 hétig, 38%-os oldatban történő, 50%-os útőszilárdság-csökkenése is bizonyít.

#### 4. Következtetések

A végrehajtott vizsgálatok eredményei alapján kijelenthető, hogy a sós vízzel történő kezelés hatására mind az erősítőszövetek, mind pedig a kompozitok jelentős mértékben degradálódnak, függetlenül az előállításukhoz felhasznált erősítőanyagtól. Látható azonban, hogy a károsodás mértékét már jelentősen befolyásolják az erősítőanyagot felépítő összetevők.

A húzó-, hajlító- és Charpy-mérések eredményei alapján a bazaltszál szövettel erősített minták a legellenállóbbak a vizsgáltak közül, amit a bazaltszál felépítő fémek és azok oxidjai okoznak. Ennek a viselkedésnek és ellenálló képességnek köszönhetően a bazaltszál szövet különböző tengervizes környezetben üzemelő kompozitszerkezetek, például off-shore szélerőművek egyes alkatrészei alapanyagává válhat, ezáltal további elterjedése prognosztizálható.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Haldar S. K., Tišljár J.: *Igneous Rocks*. In: *Introduction to Mineralogy and Petrology*. (Szerk.: Haldar S. K., Tišljár J.) Elsevier, Waltham, 2014. 93–120. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408133-8.00004-3>
- [2] Kogan F. M., Nikitina O. V.: *Solubility of chrysotile asbestos and basalt fibers in relation to their fibrogenic and carcinogenic action*. *Environmental Health Perspectives*, 102. (1994) 205–206. <https://doi.org/10.1289/ehp.94102s5205>
- [3] Jamshaid H., Mishra R.: *A green material from rock: basalt fiber – a review*. *The Journal of The Textile Institute*, 107/7. (2015) 923–937. <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1071940>
- [4] Wei B., Cao H., Song, S.: *Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment*. *Materials & Design*, 31/9. (2010) 4244–4250. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.009>
- [5] Širok B., Bizjan B., Orbanic A., Bajcar T.: *Mineral wool melt fiberization on a spinner wheel*. *Chemical Engineering Research and Design*, 13. (2013) 1–48. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.06.014>
- [6] Wojnárovits I., Rendessy E.: *A szilikátszálak mechanikai tulajdonságait befolyásoló tényezők*. *Építőanyag*, 45. (1993) 50–55.
- [7] Hussain S. M., Shah S. Z. H., Megat-Yusoff P. S. M., Hussain M. Z.: *Degradation and mechanical performance of fibre-reinforced polymer composites under marine environments: A review of recent advancements*. *Polymer Degradation and Stability*, 215. (2023) 110452. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegrad-stab.2023.110452>
- [8] Wei B., Cao H., Song, S.: *Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater*. *Corrosion Science*, 53/1. (2011) 426–431. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.09.053>
- [9] Bonsu A. O., Liang W., Mensah C., Yang B.: *Assessing the mechanical behavior of glass and basalt reinforced vinyl ester composite under artificial seawater environment*. *Structures*, 38. (2022) 961–978. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.053>
- [10] Bonsu A. O., Mensah C., Liang W., Yang B., Ma Y.: *Mechanical Degradation and Failure Analysis*

- of Different Glass/Basalt Hybrid Composite Configuration in Simulated Marine Condition.* *Polymers*, 14. (2022) 3480.  
<https://doi.org/10.3390/polym14173480>
- [11] Davies P., Verbouwe W.: *Evaluation of Basalt Fibre Composites for Marine Applications.* *Applied Composite Materials*, 25/2. (2017) 299–308.  
<https://doi.org/10.1007/s10443-017-9619-3>
- [12] Kaybal H. B., Ulus H., Avci A.: *Seawater Aged Basalt/Epoxy Composites: Improved Bearing Performance with Halloysite Nanotube Reinforcement.* *Fibers and Polymers*, 22. (2021) 1643–1652.  
<https://doi.org/10.1007/s12221-021-0671-0>
- [13] Sukur E. F., Onal G.: *Long-term salt-water durability of GNPs reinforced basalt-epoxy multiscale composites for marine applications.* *Tribology International*, 158. (2021) 106910.  
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106910>
- [14] Shi J., Wang X., Wu Z., Zhu, Z.: *Fatigue behavior of basalt fiber-reinforced polymer tendons under a marine environment.* *Construction and Building Materials*, 137. (2017) 46–54.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.063>
- [15] Chowdhury I. R., O'Dowd N. P., Comer, A. J.: *Experimental study of hygrothermal ageing effects on failure modes of non-crimp basalt fibre-reinforced epoxy composite.* *Composite Structures*, 275. (2021). 114415.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114415>
- [16] Fiore V., Scalici T., Di Bella G., Valenza, A.: *A review on basalt fibre and its composites.* *Composites Part B: Engineering*, 74. (2015) 74–94.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.034>
- [17] Machado L. C., Marins A. A. L., Muri E. J. B., Biondo A., Matos J. do R., Mazali I. O.: *Complexation of the Fe(III) and Fe(II) sulphates with diphenyl-4-amine barium sulphonate (DAS) Synthesis, thermogravimetric and spectroscopic studies.* *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 97/289. (2009) 289–296.  
<https://doi.org/10.1007/s10973-009-0259-1>
- [18] Mielczarski J. A., Atenas G. M., Mielczarski E.: *Role of iron surface oxidation layers in decomposition of azo-dye water pollutants in weak acidic solutions.* *Applied Catalysis B: Environmental*, 56/4. (2005) 289–303.  
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2004.09.017>
- [19] Diallo H., Rabiller-Baudry M., Khaless K., Chaufer B.: *On the electrostatic interactions in the transfer mechanisms of iron during nanofiltration in high concentrated phosphoric acid.* *Journal of Membrane Science*, 427. (2013) 37–47.  
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.08.047>



# Szerszámacélok tulajdonságainak változása a hőkezelés hatására

## Effect of Heat Treatment on the Properties of Tool Steel

Tóth László

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Gépészeti és Technológiai Intézet, Anyagtechnológiai Intézet, Tanszék, Budapest, Magyarország, [toth.laszlo@bkg.uni-obuda.hu](mailto:toth.laszlo@bkg.uni-obuda.hu)

### Abstract

Tool production has deep importance for the industry. The developed tool steels are suitable for the requirements. These tool steels contain large amounts of alloying elements and carbon. The required properties are determined by the chemical composition and microstructure of the tool steel. High hardness, wear resistance, strength, toughness, and corrosion resistance can be achieved by heat treatment which can modify the microstructure. Sub-zero treatment, shallow cryogenic treatment, and deep cryogenic treatment technology, and the resulting microstructure, are given a prominent place in this paper. The review is summarized based on literature research on the experimental results of heat treatment of tool steels.

**Keywords:** *tool steel, heat treatment, retained austenite, high tempering temperature, cryogenic treatments.*

### Összefoglalás

A szerszámgyártás kiemelt fontosságú az ipar számára. Olyan szerszámacélokat fejlesztettek, melyek a szerszámokkal szembeni követelményeket teljesítik. Kémiai összetételüket tekintve nagy mennyiségű ötvözőt és korbont tartalmaznak. Az elvárt tulajdonságokat a szerszámacél vegyi összetétele és a szövetszerkezet határozza meg. Az acél mikroszerkezetét hőkezeléssel az elrendő tulajdonságoknak megfelelően lehet módosítani, ennek eredményeként nagy keménységet, kopásállóságot, szilárdságot, szívósságot és korrózióállóságot lehet elérni. A 0 °C alá hűtés (sub zero treatment), az enyhe mélyhűtés és a mélyhűtés technológiája, valamint az ezek hatására létrejövő mikroszerkezet kiemelt helyet kapott a dolgozatban. A munka irodalomkutatásra épülő számos szerszámacél hőkezelését bemutató kísérleti eredmény feldolgozásával készült összefoglaló munka.

**Kulcsszavak:** *szerszámacél, hőkezelés, maradék ausztenit, magas hőmérsékletű megeresztés, mélyhűtés.*

### 1. Bevezetés

A szerszámacélok ötvözten vagy ötvözött acélok, melyeket elsősorban más anyagok megmunkálására, alakítására alkalmaznak. A szerszámacélok felhasználhatóságát a tulajdonságaik határozzák meg. A szerszámacélok főbb tulajdonságai a kopásállóság, keménység, szívósság, melegszi-lárdság, korrózióállóság, polírozhatóság, nyomószilárdság, nitridálhatóság, bevonatolhatóság [1]. E tulajdonságokat a vegyi összetétel és a szövetszerkezet befolyásolja. Így például a szén meghatározza az elérhető keménységet, szilárdságot, edzhetőséget és a martenzites átalakulás kezdeti, illetve befejező hőmérsékletét [2]. A króm növeli

az átedzhetőséget, karbidképzőként a kopásállóságot, éltartósságot, nagyobb mennyiségben a korrózióállóságot [3]. A vanádium finomítja a primer szemcséket, ezáltal növeli a szívósságot, a kopásállóságot, éltartósságot és a melegszi-lárdságot, éltartósságot és a nagy hőmérsékleti kopásállóságot. A volfrám kemény karbidjai növelik a melegszi-lárdságot és a nagy hőmérsékleti kopásállóságot. A kobalt megakadályozza a nagy hőmérsékleti szemcsenövekedést [4–6].

A szerszámacélok szerkezeti felépítése, szövetszerkezete és szemcsemérete szintén hatással van a tulajdonságokra [7, 8], melyek függhetnek az alapanyag gyártási technológiájától, így lehet hagyományos, átolvasztott vagy porkohászati a képlekeny alakítástól, pl. melegalakítás vagy hi-

degalakítás, illetve a hőkezelésektől [9–11].

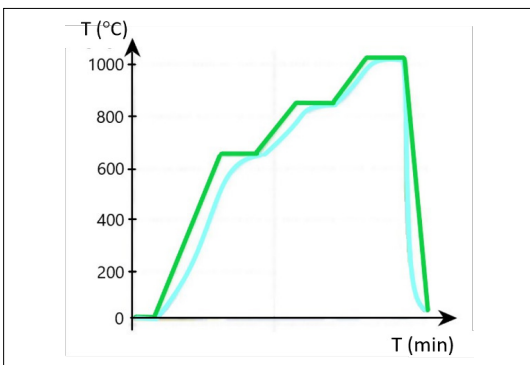
A szerszámacélokat széles körben alkalmazzák ott, ahol kopásállóságra, szilárdságra, szívósságra, illetve korrózióállóságra van szükség. A szövetszerkezet hőkezeléssel változtatható, illetve állítható be [12, 13]. A hőkezelések hevítési, hőtartási és hűtési ciklusokból állnak [14]. A feszültségcsökkentés, lágyítás, normalizálás, edzés és megeresztés a legfontosabb hőkezelések, amelyeket gyakran használunk az acél mikroszerkezetének módosítására és a kívánt mechanikai tulajdonságok elérésére [15]. Hőkezelést alkalmazhatunk gyártás előtt, gyártás közben vagy gyártás után. Például egy szerszám gyártása során a kiinduló alapanyag lágyító hőkezelésnek van alávetve a megmunkálhatóság érdekében, gyártás közben az anyagban képződött feszültségek csökkentése miatt feszültségcsökkentő hőkezelést végeznek. A kész szerszámot a kívánt keménységűre edzik, aztán megeresztik, igény esetén még felületi hőkezelést vagy bevonatolást is végezhetnek [16–18].

A felsoroltak alapján is érezhető, hogy a szerszámacélok kívánt tulajdonságai elérésének egyik fő módszere a hőkezelés lehet. Tanulmányomban a következőkben részletesebben kitérek a szerszámok munkakeménységre való optimális hőkezelési eljárásaira és a felületkezelések, illetve bevonatolások fontosságára.

## 2. Szerszámacélok edzése

Az edzés az ausztenitesítési hőmérsékletre való hevítésből, hőtartásból és a kritikus hűtési sebességnél gyorsabb hűtésből áll (1. ábra).

Az 1. ábrán egy szerszámacél edzési diagramját láthatjuk a hőmérséklet és az idő függvényében. Hevítés során az anyagban feszültségek keletkezhetnek, melyek méretváltozást, illetve torzulást okozhatnak. Ennek elkerülése érdekében aján-



1. ábra. Edzési diagram

lott a lassú felfűtés. Az átalakulási hőmérsékletek alatt 650 °C, illetve 850 °C-on hőkiegyenlítő lépéscsőt kell tartani azért, hogy kiegyenlítődjék a hőmérséklet a szerszám magja és a felülete között. A diagramon a zöld görbe mutatja a szerszám felületén mért hőmérsékletet, míg a kék a szerszám középpontjában a hőmérsékletet. Az ausztenitesítési hőmérsékleten a hőkiegyenlítődé után tovább tart a hőtartás a homogén ausztenit kialakulásáig [16].

Adott acélminőség ausztenitesítési hőmérséklete is befolyásolhatja a tulajdonságokat. Az ausztenitesítés elvégezhető kisebb vagy nagyobb hőmérsékleten is. Az Uddeholm cég által gyártott Sverker 21 minőségű hidegalakító szerszámacél 1020 °C-on történt ausztenitesítési utáni edzéssel elért keménysége 62 HRC, míg 1075 °C-on 61 HRC lett [17]. A nagy hőmérsékletű edzés utáni kisebb keménységi érték a primer karbidok részleges oldódásának, illetve a durvább ausztenitzemcséből át nem alakult maradék ausztenit mennyiségének köszönhető [18, 19].

A maradék ausztenit az edzés során képződik, amikor az ausztenit egy része nem tud átalakulni martenzitté. Ez az átalakulás egy diffúzió nélküli átalakulás, mely az  $M_s$  azaz a martenzites átalakulás kezdeti hőmérsékletén (angolul martensit start) kezdődik, és az  $M_f$  azaz a martenzites átalakulás befejezési hőmérsékletén (angolul martensite final) ér véget. Az  $M_s$  illetve  $M_f$  hőmérsékletet az acél karbontartalma határozza meg, mely a szerszámacélok esetében nagy, így az  $M_s$  és  $M_f$  kis, sőt az  $M_f$  negatív tartományba esik [45]. Ezért is szükséges a mélyhűtés. A maradék ausztenit nem kívánt fázis a szerszámacélok esetében, mivel feszültséget és méretváltozást okoz. A feszültség az anyagban belül ott képződik, ahol az át nem alakult ausztenit található, ugyanis az ausztenit térfogata kisebb, mint a martenzité, így a fázisok között húzó-nyomó feszültség keletkezik. A maradék ausztenit egy lágy és instabil fázis, mely amellet, hogy csökkenti a keménységet, a szerszám működése közben az igénybevételek hatására martenzitté alakul, és ezáltal a szerszám repedéseket, illetve szerszám-törést okozhat [20–22]. Az edzés utáni maradék ausztenit mennyiségének csökkentésére a leghatékonyabb módszer a mélyhűtés [23–25].

### 2.1. A mélyhűtés és hatásai

A mélyhűtés, angolul „cryogenic treatment”, azt jelenti, hogy az acélt negatív hőmérsékletre hűtik az anyag sajátos tulajdonságainak elérése céljából.



A mélyhűtés három különböző hőmérsékleti tartományra osztható. Az első a 0 °C alatti tartomány (angolul sub zero treatment), mely –80 °C-ig tart. Ebben a tartományban a maradék ausztenit nagy része martenzitté alakul, javul az acél kifáradással szembeni ellenállása, a méretstabilitás, és nő az acél kopással szembeni ellenállása [26]. A második tartomány az ún. enyhe mélyhűtés (angolul shallow cryogenic treatment), mely a –80 és –160 °C közötti tartományt foglalja magába. Ebben a tartományban a maradék ausztenit mennyisége 1,8% alá csökkenthető, ami méretstabilitást biztosít, kopásállóságot és nem utolsósorban a szerszám élettartamának növekedését [27, 28]. Az 1. táblázat egy elektrosalakos átolvasztással gyártott K340-es minőségű Böhler hidegalakító szerszámacél röntgendiffrakciós vizsgálati eredményeit mutatja be egy hagyományosan hőkezelt (CHT, angolul conventional heat treated) és egy –150 °C-ra hűtött, azaz enyhe mélyhűtött (SCT, angolul shallow cryogenic treated) mintadarabon. Az eredmény azt mutatja, hogy a sekély mélyhűtött próbatést maradékausztenit-tartalma több mint 3-szor kevesebb, mint a hagyományosan hőkezelté, karbidtartalma meg 20%-kal több, ami a másodlagos karbidkiválásoknak köszönhető. Ez a keménységnövekedés mellett jobb kopási tulajdonságot is biztosít az acélnek.

1. táblázat. K340 acél XRD vizsgálati eredménye [27]

Fázisok (tömeg %)	1- CHT	2- SCT (–150 °C)
Martenzit	62,8	55,8
Maradék ausztenit	6,2	1,8
M <sub>2</sub> C (V,Nb)	5,2	4,8
M <sub>7</sub> C <sub>3</sub> (Cr, Fe)	16,7	24,6
M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> (Cr, Fe)	9,1	5,3
M <sub>3</sub> C <sub>2</sub> (Cr,Fe)	0	7,7

A harmadik tartomány (–160 °C től –196 °C-ig tart) az úgynevezett mélyhűtés (DCT, angolul deep cryogenic treatment), mely nemcsak a szerszám méretstabilitását biztosítja, hanem jelentősen növeli a kopásállóságát, a keménységét, a szilárdságát, de bizonyos esetekben még a korrózióállóságát is [29, 30].

A mélyhűtéses hőkezelések pozitív hatásai miatt számos területen terjedtek el, mint például az additív gyártással előállított termékek esetében [31], elektródák [32], hegesztett kötések [33], anyagok megmunkálásai során [34–36]. A mélyhűtés alkalmazásai elterjedtek a nanotechnológiákban [37] és más iparágakban is, mint például

az orvostudomány, az űrkutatás, a zene, az autópia [38–40] területén. Az alkatrészek, szerszámok élettartama és teljesítménye is nagyban függ az alkalmazott hőkezelési technológiáktól. Mélyhűtéssel nagymértékben javíthatók a szerszám-célok mechanikai, termokémiai és tribológiai tulajdonságai [41, 42].

A mélyhűtésben nagy lehetőségek rejlenek a fémek anyagok tulajdonságainak javítására és a szerszámok élettartamának növelésére.

A Böhler M340 ISOPLAST elektrosalakosan átolvasztott minőségű műanyagforma acél edzés utáni mélyhűtéssel és háromszorosan nagy hőmérsékletű megeresztéssel végzett próbatestek tulajdonságait hasonlítottuk össze a hagyományosan, azaz mélyhűtés nélkül hőkezelt próbatestekkel [43]. A hőkezelési diagramot a 2. ábra szemlélteti.

A mélyhűtött próbatest keménysége 1 HRC-vel lett nagyobb a hagyományosan hőkezelténél, a kopási tényezője 45%-kal lett kedvezőbb, míg a korróziós tömegvesztés 15%-kal csökkent.

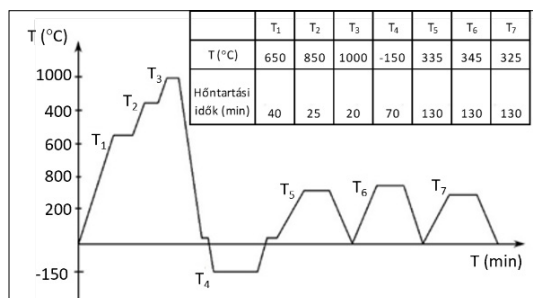
A mélyhűtést edzés után és megeresztés előtt szokás elvégezni [44].

### 3. A megeresztés és hatásai

Az edzés utáni feszültséggel teli martenzites szövet rideg és törékeny, gyakorlati alkalmazásra nem ajánlott. Felhevítve 200–600 °C közé a feszültségek enyhülnek, relaxálódnak. A szerszámacélok szövetszerkezete martenzitet, maradék ausztenitet és karbidokat tartalmaz, de újból felhevítve egy adott hőmérsékletre az A<sub>C1</sub> átalakulási hőmérséklet alá, csökken a feszültsége és a maradék ausztenit mennyisége.

Szerszámacélok megeresztése során az edzés utáni rideg martenzites szövet megeresztése, illetve szerszámacélok esetében a homogén szferoiditos szövetszerkezet elérése a cél.

A szerszámacél edzését mindig azonnal a megeresztésnek kell követnie (kivéve, ha mélyhűtést alkalmazunk).



2. ábra. A Böhler M340 ISOPLAST acél hőkezelési diagramja

Kis hőmérsékletű megeresztéssel csak a martenzit megeresztődését érhetjük el, míg nagy hőmérsékletű megeresztéssel a maradék ausztenit mennyisége is csökkenthető.

Az első megeresztés után, nagy megeresztési hőmérséklet esetén a szövetszerkezet megeresztett martenzitet, újonnan alakult martenzitet (maradék ausztenitből), valamennyi maradék ausztenitet és karbidokat tartalmaz. Ez esetben új karbidok, ún. másodlagos (szekunder) karbidok válnak ki, melyek az újonnan képződött martenzittel megemelhetik a keménységet. Ezt nevezik másodlagos (szekunder) keményedésnek.

A szerszámacélokat legalább kétszer kell megeresztetni nagy hőmérsékleten. Ekkor az első megeresztés után megeresztődött martenzit szferoiditté, az újonnan alakult martenzit megeresztett martenzitté, a maradék ausztenit pedig martenzitté alakul.

Harmadik nagy hőmérsékletű megeresztés javasolt gyorsacélok, melegmunkaacélok, főleg öntőszerszámok esetében, nagyobb műanyagforma szerszámok hőkezelésekor, valamint bonyolult geometriájú, nagy méretpontosságú darabok esetén. A harmadik megeresztés lényege a homogén szferoiditos szövet elérése, illetve az anyag hőkezelés utáni feszültségcsökkentése.

Patricia Jovicevic-Klug és társai vizsgálták a gyorsacélok tulajdonságainak változását a mélyhűtés (DCT) hatására [45], és arra a következtetésre jutottak, hogy a mélyhűtés (DCT) növeli az acél keménységét, javítja a fáradással szembeni ellenállást, növeli a nyomószilárdságot és az ütőmunkát, ezáltal javítva a szívósságot. Mindezen tulajdonságokra azonban a mélyhűtés mellett hatást gyakorol az ausztenitesítési hőmérséklet és a megeresztési hőmérséklet. Vizsgálataikból az is kiderül, hogy egy kis ausztenitesítési hőmérséklet és egy nagy megeresztési hőmérséklet kedvezőbb tulajdonságokat biztosít a gyorsacélok esetében, mint egy nagy edzési hőmérséklet és egy kis megeresztési hőmérséklet.

Kutatásaink alapján megállapítottuk, hogy a Böhler K110-es hidegalakító szerszámacél esetében a nagy edzési hőmérséklet, mélyhűtés és háromszoros nagy hőmérsékletű megeresztés során a legkedvezőbbek a mechanikai tulajdonságok [46]. A nagy hőmérsékletű edzés (1070 °C) és a kis hőmérsékletű megeresztés (200 °C) után 641 HV lett a keménység, míg a magas hőmérsékletű edzés (1070 °C), mélyhűtés (-80 °C) és háromszoros nagy hőmérsékletű megeresztés (480 °C) után 738 HV keménységet mértünk, ami 14%-os növekedést jelentett.

A kísérletek azt bizonyítják, hogy a szerszámacélok kedvező tulajdonságait homogén, kisméretű, egyenletes eloszlású karbidokat tartalmazó szferoidites szövet kialakításával érhetjük el. Ezt a szövetszerkezetet nagy hőmérsékletű edzést követő mélyhűtéssel és háromszoros nagy hőmérsékletű megeresztéssel lehet elérni. Egy ilyen szövet nagy keménység mellett szívósságot, kopásállóságot, esetenként korrózióállóságot biztosít a szerszám számára, és nem utolsósorban élettartam-növekedést. E tulajdonságok elérésére jól kidolgozott optimális hőkezelési technológia szükséges. Nagyobb felületi keménységet, illetve kopásállóságot felületkezelés útján lehet elérni.

## 4. Szerszámacélok felületkezelése

A szerszám felületkezelésének célja a kopásállóság növelése, az adhézió csökkentése és a kialakított alkatrész minőségének javítása.

A szerszámgyártás során a legelterjedtebb felületkezelések a nitridálások és a bevonatolások.

### 4.1. Szerszámacélok nitridálása

Nitridálás során a szerszám felületi rétegébe nitrogén diffundálnak, mely az acélban lévő nitridképző elemekkel kemény kopásálló vegyületet képez. Nitridálásra a legalkalmasabb acélok a közepes széntartalmú szerszámacélok, melyek alumíniummal, krómmal, molibdénnel, illetve vanádiummal vannak ötvözve. Fontos, hogy a szerszám utolsó megeresztési hőmérséklete a nitridálás hőmérséklete alatt legyen, különben kilágyulhat.

A legelterjedtebb nitridálási eljárások a gáznitridálás és a plazmanitridálás.

#### 4.1.1. Gáznitridálás

A nitridált kéreg egy vegyületi (fehér) és egy diffúziós rétegből tevődik össze. A vegyületi réteg felelős a kopással, súrlódással és rátapadásal szembeni ellenállásért, míg a diffúziós réteg a kifáradással szembeni ellenállásért. A vegyületi réteg vastagsága mikronos nagyságrendű (10 µm körül), míg a diffúziós rétegé 0,1–1 mm körül.

A gáznitridálást általában nitrogénben gazdag gázban, ammóniában végzik. Amikor az ammónia érintkezésbe kerül a felhevített munkadarabbal, nitrogénre és hidrogénre bomlik, és a nitrogén a darab felületébe diffundál. A nitridált réteg keménysége a szerszámacélok felületén elérheti a 950–1200 HV értéket. A gáznitridálás hőmérséklete 500–570 °C között változhat. Guo-meng Li és társai a nitridált M50NiL acél esetében a legjobb kopási ellenállást az 500 °C-os hőmérséklet alkalmazásával érték el [47].

#### 4.1.2. Plazmanitridálás

A plazmanitridálást általában 480–520 °C közötti hőmérsékleten végzik. Ezen eljárás nagy előnye, hogy a többi nitridálási eljárással szemben jól szabályozható, könnyen reprodukálható, rövid időtartamú, és aránylag kis hőmérsékleten végezhető [48, 49].

Kolozsváry Zoltán a nitridált réteg szerkezetét és tulajdonságait vizsgálta dolgozatában [50].

Kísérleteink során egy H13 minőségű melegmunkaacélon 520 °C hőmérsékleten végzett plazmanitridálás után a 200 µm-es vastag rétegen 1144 HV keménységet mértünk [51]. A megállapított kopási együttható alapján a plazmanitridált felületű minta jobb kopási ellenállással rendelkezik, mint az edzett és megeresztett próbatesté.

Kovács Dorina és társai a nemesíthető és rozsdamentes acélok plazmanitridálás utáni kopási viselkedéseit vizsgálták [52].

A plazmanitridálás egyik változata az aktív ernyős plazmanitridálás (ASPN). Szilágyiné Bíró Ilona téziszüzetében [53] a próbatesteken történő elszíneződést okozó éhatást tanulmányozta az aktív ernyős plazmanitridálás során, és összehasonlította a hagyományos és aktív ernyős plazmanitridálás utáni nitridált rétegeket.

#### 4.2. Szerszámacélok felületi bevonatolása

A szerszámacélok felületi bevonatolása általános gyakorlattá vált. Ezen eljárás általános célja egy nagy keménységű és kis súrlódású felületi réteg létrehozása, mely jó kopásállóságot eredményez, minimálisra csökkentve a tapadás és ragadás kockázatát.

A bevonat jellemzően egy vékony kerámieréteg (4 µm alatti), melyet nagyon nagy keménység és kis súrlódás jellemez. A leggyakrabban alkalmazott bevonatolási eljárás a PVD (physical vapour deposition) és a CVD (chemical vapour deposition).

Kísérleteink során vizsgáltuk a X40CrMoV5-1 minőségű megalakító szerszámacél tulajdonságait különböző bevonatolások hatására [43]. A legnagyobb felületi keménységet, éspedig 2938 HV, a TiN/AlTiN PVD bevonattal értük el, amely egyben a legjobb kopási tulajdonságokat is hozta.

### 5. Következtetések

A szerszámacélok tulajdonságait a gyártási technológia, a kémiai összetétel és a mikroszerkezet határozza meg. A mikroszerkezet a hőkezeléssel állítható be, mely a megfelelő tulajdonságokat biztosítja a szerszámacélok felhasználása során.

Dolgozatomban számos releváns szakirodalom felhasználásával áttekintettem a szerszámacélok hőkezelési technológiáit, mely során összehasonlítottam a hőkezeléssel elérhető tulajdonságokat. A főbb tulajdonságok a keménység, kopásállóság, szilárdság, szívósság, megeresztésképes állóság, melegszilárdság, korrózióállóság, mérettartóság. A legújabb kutatási eredmények alapján a szerszámok legjobb tulajdonságait és egyben a legnagyobb élettartamát a mélyhűtéses eljárás alkalmazásával lehet elérni. Felületkezeléssel és bevonatolással a kopásállóság, keménység, korrózióállóság még tovább javítható.

Az optimális hőkezelési technológia alkalmazása a kulcs az élettartam és az elvárt tulajdonságok eléréséhez.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Gaard A., Krakhamler P., Bergström J.: *Wear mechanism in deep drawing of carbon steel-correlation to laboratory testing*. Tribotest, 14. (2008) 1–9. <https://doi.org/10.1002/tt.49>.
- [2] Staia M. H., Pérez-Delgado Y., Sancho C., Castro A., Le Bourhis E., Pucho Cabrera E.: *Hardness properties on high-temperature wear behavior of nitrided AISI D2 tool steel, prior and after PAPVD coating*. Wear, 267. (2009) 1452–1461. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2003.03.045>.
- [3] Brezinová J., Vinos J., Guzanova A., Zivcak J., Brezina J., Sailer A., Voidka M. et al.: *Selected Properties of Hardfacing Layers Created by PTA Technology*. Metals, (2021). <https://doi.org/10.3390/met11010134>.
- [4] Böhler-Uddeholm Hungary Kft.: *Szerszámacélok. Nemesacélok katalógus*. [www.boehler.hu](http://www.boehler.hu) (2014)
- [5] Böhler Uddeholm AG: *Heat Treatment of Tool Steel*. [www.uddeholm.com](http://www.uddeholm.com) (2012) 39.
- [6] Tóth László: *Reduction of Retained Austenite in Tool Steels*. MTK, 16. (2022) 52–57. <https://doi.org/10.33894/mtk-2022.16.10>
- [7] P. Bala: *The Kinetics of Phase Transformations During Tempering of Tool Steels With Different Carbon Content*. Archives of Metallurgy and Materials, 2/54. (2009) 491–498.
- [8] Soares E. Jr., Vatauvuk J., Panelli R., Pillis M. F.: *Evaluation of Mechanical Properties and Microstructure of a High Carbon-vanadium Tool Steel Produced by Powder Metallurgy*. Materials Science Forum, 530–531. (2006) 140–144.
- [9] Bostjan Arh, Bojan Podgornik, Jaka Burja: *Electroslag Remelting: A Process Overview*. Materials Technology, 50. (2016) 6, 971–979. ISSN 1580\_2949.
- [10] Schickbichler M., Ramesh Babu S., Hafok M., Turk C., Schneeberger G., Fölzer A. & Michelic S. K.: *Comparison of methods for characterising the steel cleanliness in powder metallurgical high-speed*

- steels. Powder Metallurgy. <https://doi.org/10.1088/00325899.2023.2170848>.
- [11] Korotkov A. N., Korotkova L. P., Laschinina S. V.: *Influence of production technology on the structure and properties of powder high-speed steels*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 971. (2020) 022096. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/971/2/022096>.
- [12] Bahrami A., Anijdon S. H. M., Shamanion M., Varahvam N.: *Effects of conventional heat treatment on wear resistance AISI H13 tool steel*. Wear, 258. (2005) 846–851. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09008>
- [13] Réger Mihály, Horváth Richárd, Széll Attila, Réti Tamás, Gonda Viktor, Felde Imre: *The Relationship between Surface and In-Depth Hardness for the Nitrocarburizing Treatment Process*. Metals, 11. (2021) 812. <https://doi.org/10.3390/met11050812>
- [14] Htun Min Shan, Kyaw Si Thu, Lwin Kay Thi: *Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Spring Steel*. Journal of Metals, Materials and Minerals, 18/2. (2008) 191–197.
- [15] Fadare D. A., Fadara T. G., Akanbi O. Y.: *Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of NST 37-2 Steel*. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 10/3. (2011) <https://doi.org/10.4236/jmmce.2011.103020>
- [16] Bede Martin, Tóth László: *Optimális paraméterek meghatározása dievar melegelakító szerszámacél hőkezelése során*. XXX. Hőkezelő és anyagtudomány a gépgyártásban országos konferencia és szakkiállítás, Hőkezelő proceeding (2022).
- [17] Tóth László: *A maradék ausztenit mennyiségének csökkentése szerszámacélok esetében*. Műszaki Tudományos Közlemények, 16. (2022) 52–57. <https://doi.org/10.33895/mtk-2022.16.10>
- [18] Yiwa Luo, Hanjie Guo, Xiaolin Sun, Mingtao Mao, Jing Guo: *Effect of Austenitizing Conditions on The Microstructure of AISI M42 High-Speed Steel*. Metals, 7. (2017) 27. <https://doi.org/10.3390/met7010027>
- [19] Sola R., Veronesi P., Giovanardi R., Forti A., Parigi G.: *Effect of heat treatment before cryogenic cooling on the properties of AISI M2 steel*. Metall. Ital., 109. (2017) 5–16.
- [20] R. Pierer, R. Schneider, H. Hiebler: *The behavior of two new steels regarding dimensional changes*. 6th International Tooling Conference, 2022, 611–624.
- [21] P. Sekhbar Babui: *Effects of Cryogenic Treatment on H13 Tool steel - An Experimental Investigation*. International Journal of Metallurgical & Materials Science on Engineering, 3/2. (2013) 53–58. ISSN 2278-2516.
- [22] M. Arbab Rehan, Anna Medvedeva, Lars-Erik Svensson, Leif Karlsson: *Retained Austenite Transformation during Heat Treatment of a 5 Wt Pct Cr Cold work Tool Steel*. Metallurgical and Materials Transaction, 481. (2017). <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4232-5>
- [23] Arunram S. P., Nishal M., Thirumugham M., Raghunath A. G.: *Effect of deep and shallow cryogenic treatment on high speed steel grade M2 drilling tool*. Materials Today: Proceedings, 46/19. (2021), 9444–9448.
- [24] Dumasia C. A., Kulkarni V. A., Sonar K. A.: *Review on the effect of cryogenic treatment on metals*. International Research Journal of Engineering and Technology, 4/7. (2017). ISSN: 2395-0072.
- [24] 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>
- [25] Chopra Swamini A., Sargade V. G.: *Metallurgy behind the Cryogenic Treatment of Cutting Tools: An Overview*. 4th International Conference on Materials Processing and Characterization, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.119>.
- [26] Yarasu Venu, Jurci Peter, Gogola Peter, Podgornik Bojan, Sedlacek Marko: *Sliding wear behaviour of conventional and cryotreated PM Cr-v (Vanadis 6) ledeburitic tool steel*. Wear, (2023) 532–533. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205107>
- [27] Jovicevic-Klug Patricia, Tóth László, Podgornik Bojan: *Comparison of K340 Steel Microstructures and mechanical properties using shallow and Deep Cryogenic Treatment*. Coatings, 12. (2022) 1296. <https://doi.org/10.3390/coatings12091296>
- [28] Tóth László, Fábíán Enikő Réka: *Possibility for Improving the Properties of the Plastic Mold Tool In order to Increase its Service Life*. European Journal of Materials Science and Engineering, 7/4. (2022) 299–305. <https://doi.org/36838/ejmse.2022.07.04.299>
- [29] Essam M. A., Shash A. Y. El-Fawakhry M. K., El-Kashif E., Megahed, H.: *Effect of Deep Cryogenic Treatment on Wear Behavior of Cold Work Tool Steel*. Metals, 13. (2023) 382. <https://doi.org/10.3390/met13020382>
- [30] Voglar J., Novak Ž., Jovicevic-Klug P., Podgornik B., Kosec, T.: *Effect of Deep Cryogenic Treatment on Corrosion Properties of Various High-Speed Steels*. Metals, 11. (2021) 14. <https://doi.org/10.3390/met11010014>
- [31] Bartolomé E., Bozzo B., Sevilla P., Martínez-Pasarell O., Puig T., Granados X.: *ABS 3D printed solutions for cryogenic applications*. Cryogenics, 82. (2017) 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2017.01.005>
- [32] Zhisheng W., Ping S., Jinrui L., Shengsun H.: *Effect of deep cryogenic treatment on electrode life and microstructure for spot welding hot dip galvanized steel*. Materials and Design (2003) 24. 687–692.

- [33] Lin Y. T., Wang M. C., Zhang Y., He Y. Z., Wang D. P.: *Investigation of microstructure evolution after postweld Heat Treatment and cryogenic fracture toughness of the weld metal of AA2219 VPTIG joints*. Materials and Design, 113. (2017) 54–59. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.010>
- [34] Paul S., Chattopadhyay A. B.: *Environmentally conscious machining and grinding with cryogenic cooling*. Machining Science and Technology, 10. (2007) 87–131. <https://doi.org/10.1080/10910340500534316>
- [35] Govindaraju N., Shakeel A. L., Pradeep Kumar M.: *Experimental investigations on cryogenic cooling in the drilling of AISI 1045 Steel*. Materials and Manufacturing Process, 29. (2014) 1417–1421. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.930952>
- [36] Su Y., He N., Li L., Zhao W.: *Effects of cryogenic nitrogen gas jet on machinability of Ti-alloy in high-speed milling*. China Mechanical Engineering, 17. (2006) 1183–1187.
- [37] La Rocca A., Di Liberto G., Shayler P. J., Fay M. W.: *The nanostructure of soot-in-oil particles and agglomerates from an automotive diesel engine*. Tribology International, 61. (2013) 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.12.002>
- [38] Iacopi F., Choi J. H., Terashima K., Rice P. M., Dubois G.: *Cryogenic plasmas for controlled processing of nanoporous materials*. Phys. Chem. Chem. Phys., 13. (2011) 3634–3637. <https://doi.org/10.1039/c0c02660c>
- [39] Thornton R., Slatter T., Jones A. H., Lewis R.: *The effects of cryogenic processing on the wear resistance of grey cast iron brake discs*. Wear, 271. (2011) 2386–2395. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.014>
- [40] Ming C. J. E. R.: *Cryogenic Treatment of Music Wire*. Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Singapore, 2004. <https://scholarbank.nus.edu.sg/haler/10635/14397>
- [41] Mahdi Koneshlon, Kaveh Meshinchi, Farzad Khomamizadeh: *Effect of cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviours of AISI H13 hot work tool steel*. Cryogenics, 51. (2011) 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.11.001>
- [42] Debdulal D. Das & Ray K. K.: *On the mechanism of wear resistance enhancement of tool steels by deep cryogenic treatment*. Philosophical Magazine Letters, 92/6. (2012) 295–303. <https://doi.org/10.1080/09500839.2012.669052>
- [43] Körösi Gábor, Dr. Tóth László, Dr. Pinke Péter: *Vizsgálatok a PVC granuláló szerszám élettartamának növelésére*. Mérnöki Szimpózium a Bánkin, ESB, 2022. 194–199. <http://bgk.uni-obuda.hu/esb>, ISBN 978-963-449-306-8
- [44] Jovicevic-Klug Patricia, Podgornik Bojan: *Effect of Deep Cryogenic treatment of Metallic Materials in Automotive Application*. 2020. <https://doi.org/10.3390/met10040434>.
- [45] Jovicevic-Klug Patricia, Pus Gasper, Jovicevic-Klug Matic, Zuzek Borut, Podgornik Bojan: *Influence of heat treatment parameters on effectiveness of deep cryogenic treatment on properties of high-speed steels*. Materials Science & Engineering, A829. (2021) 142157. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142157>
- [46] Tóth L., Fábíán E. R.: *The Effects of Quenching and Tempering Treatment on the Hardness and Microstructures of a Cold Work Steel*. International Journal of Engineering and Management Sciences, 4/1. (2019). <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2019.1.36>
- [47] Guo-meng Li, Yi-long Liang, Hao Sun, Yun-gang Cao: *Nitriding behaviour and mechanical properties of carburizing and nitriding duplex treated M50NiL steel*. Surface and Coatings Technology, 384. (2019) 125315. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125315>.
- [48] Podgornik B., Majdic F., Leslovsek V., Vizintin J.: *Improving tribological properties of tool steels through combination of deep-cryogenic treatment and plasma nitriding*. Wear, 288. (2011) 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.04.001>.
- [49] Georges J., Lebrun J.: *Plasma-nitriding and postoxidizing: An innovative and eco-friendly solution with strong reduced consumption of gas and energy*. Nitriding and Nitrocarburising Conference Proceedings, Aachen, Germany, 2010.
- [50] Kolozsváry Z.: *Nitriding Structure and Properties of Nitriding Layers*. ASM Handbook, Volume 40, Treating of Iron and Steels, 2014. ISBN: 978-1-62708-066-8.
- [51] Tóth László, Kovács Tünde Anna, Nyikes Zoltán, Ghica Valeriu-Gabriel: *Increasing the H13 Tool Steel Wear Resistance by Plasma Nitriding and Multilayer PVD Coating*. U. P. B. Sci. Bull, Series B, 83/2. (2021). ISSN 1454-2331.
- [52] Kovács Dorina, Blücker József, Dobránszky János, Fábíán Réka: *Nemesíthető acélok és rozsdamentes acélok plazmanitridálása*. 2016, XXI. FMTÜ. <https://doi.org/10.33895/mtk2016.05.50>
- [53] Szilágyiné Bíró Andrea: *The Influence of Bios Voltage on The Layer Structure in Active Screen Plasma Nitriding*. Booklet of PHD Theses, University of Miskolc, 2017.
- [54] Bitay Enikő, Tóth László, Kovács Tünde Anna, Nyikes Zoltán, Gergely Attila Levente: *Experimental Study on the Influence of TiN/AlTiN PVD Layer on the Surface Characteristics of Hot Work Tool Steel*. Appl. Sci., 11. (2021) 9309. <https://doi.org/10.3390/app11199309>



## Ortopédiai ortézis károsodási folyamatainak vizsgálata

## Examination of Damage Processes of Orthopaedic Orthosis

Vincze Kata Dóra

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország. dori.vincze99@gmail.com*

### Abstract

In my work, I examined a palmar forearm splint manufactured by a Hungarian medical device producer. Considering the test results that come from failure analysis, material composition analysis, hardness testing, macroscopic and microscopic examination, scanning electron microscopy and implemented on a product damaged under real conditions, I concluded that the medical device, returned by the customer, had broken prematurely due to improper use. The results of the fatigue test carried out as a physical simulation of the load show that the medical device can withstand more than 850 cycles of micromotion without any problems. Macrofractographic comparisons were performed between the fracture surfaces of the device returned by the users and those of that dismantled under laboratory conditions, thus confirming the validity of my measurement.

**Keywords:** *medical device, orthosis, failure analysis, validation, scanning electron microscopy.*

### Összefoglalás

A munkám során egy magyar orvostechnikai cég által gyártott palmáris alkarsínt vizsgáltam. A valós feltételek között károsodott termékeken végzett különféle vizsgálatok – károsodáselemzés, anyagösszetétel-vizsgálat, keménységvizsgálat, makroszkópos és mikroszkópos vizsgálat, pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat – értékelésével arra a következtetésre jutottam, hogy a vevő által visszaküldött orvosi eszköz a nem megfelelő használat miatt törött el idő előtt. A terhelés fizikai szimulációjaként elvégzett fárasztóvizsgálat eredménye szerint az orvosi eszköz több mint 850 ciklusnyi mikromozgásnak is gond nélkül ellenáll. Makrofraktográfiai összehasonlítást végeztem a használok által visszaküldött, valamint a laboratóriumi körülmények között, fárasztógéppel szétroncsolt eszköz töretfelületei között, ezzel alátámasztva a mérésem hitelességét.

**Kulcsszavak:** *orvosi eszköz, ortézis, károsodáselemzés, validáció, pásztázó elektronmikroszkópia.*

### 1. Bevezetés

Alapvetően az ortéziseknek (ortézis = Olyan anyag, eszköz vagy készülék, mely védi, rögzíti a mozgásszervek sérült részeit. Gyakran használt ortézis pl. a gipszkötés és a sín) sokoldalú a szakirodalmi múltjuk.

Haarman és társai ismertettek egy, a kézműködést támogató eszközt, amely jelentősen javíthatja az izomgyengeségben szenvedő betegek életminőségét. A szerzők egy új, szalagrugókon alapuló erőátviteli mechanizmust fejlesztettek ki kézi ortézisben való használatra. A működtetőerőt egy szalagrugóból, két csúszoblokkból és ujjanként

egy-egy végütközőből álló rendszer továbbítja az ujjra. A szalagrugó lehetővé teszi az egyik irányú hajlítást, és ellenáll a másik irányú hajlításnak. Az új mechanizmusból prototípust készítettek. A kis profil (megvastagító hatás) és a nagy erők átvitelének képessége alkalmassá teszi ezt a mechanizmust kézi ortézisekhez [1].

Hansen és társai rámutatnak, hogy a sztrók gyakran flexor hypertoniát, valamint az ujjnyújtás gyengeségét okozza. Ebben a cikkben a szerzők a DigEx és a MIDAS passzív karortézisek fejlesztését részletezik. Gyorsan cserélhető büttykös rendszert valósítottak meg, amely egykezes büttykös cserélgetést biztosít. Szíjtárcsákat

és csapágyakat adtak hozzá az eszközhöz, hogy csökkentsék a mechanikai érintkezések és az anyaghibák által okozott súrlódást. A prototípus kezdeti tesztjei ígéretesek voltak [2].

László Gábor és társai azt vizsgálták, hogy az éjszakai immobilizáció mint monoterápia szignifikáns módon javítja a klinikai tüneteket, a kéz funkcionalitását és a beteg életminőségét az I. CMC ízület arthrosisában. Az éjszaka használt, gipszszerűen körkörös stabilitást biztosító (immobilizáló), könnyen felszerelhető csukló- és nyeregízületi ortézis volt az egyetlen megengedett terápia. Az orvos a betegeket a vizsgálat befejezése után telefonon kikérdezte az esetlegesen jelentkező éjszakai panaszairól. A betegek között senki nem panaszkodott éjszakai fájdalomra [3].

Az általam elvégzett elemzés célja, hogy összehasonlítsam a gyártó cégtől kapott panasszal, a cég számára visszaküldött, törött ortézis töretfelületeinek tulajdonságait a laborkörülmények között fárasztóvizsgálatnak kitett törött eszköz töretfelületeinek tulajdonságaival. Ezen összehasonlítás fényt deríthet arra, hogy a beteg megfelelően, a használati szabályoknak eleget téve hordta-e az ortézisét. Ezen kívül megállapítom majd, hogy az eszköz megfelel-e a gyártó által vállalt minőségi és élettartambéli elvárásoknak és az orvostechnika aktuális, idetartozó szabályozásainak.

## 2. Alkarortézisek vizsgálata

### 2.1. Áttekintés a vizsgált ortézisekről

A cikkben szereplő vizsgált palmáris alkarsín méretéből ítélve gyermekek számára készült. A palmáris alkarsín a csukló, a kéz és az ujjak sokoldalú rögzítésére vagy teljes immobilizálására szolgál diszlokáció, disztorzió, műtét vagy gipszelés után. Esetlegesen gipszelés helyett is alkalmazható eszköz. Alkalmazzák még a csukló, kéz és az ujjak íngyulladásának és degeneratív elváltozásainak konzervatív kezelésére pihentető sínként, illetve műtétet követő rehabilitációs periódusra és adjuvans (gyógyszeres kezelést segítő) terápiaként [5].

A vizsgált eszköz az **1. ábrán** szemléltetett rétegekből épül fel. Először a tekercsben érkező, különböző vastagságú Al-lemezeket hullámosítják, majd a megadott formára stancolják. Ahhoz, hogy megfelelő alumíniumváz készülhessen, sok esetben több lemezt is össze kell szegecselni vagy tűzni. Összeállításnál egy réteg szövetre kerül egy réteg polifóm (térhálósított polietilén hab), majd rá az alumíniumváz, újabb polifóm és egy záró szövetréteg. Ezt a réteges szerkezetű, lapos vázat

hőlégbefúvással összesítjük, majd kiszűrőformák segítségével kivágják a réteget, hibrid anyagból. Ezután minden kistancolt sík vázat egyesével perforálják a jobb szellőzés érdekében, varrógéppel körbeszegik, majd kézzel, illetve megfelelő elendarabok (szerszámok) segítségével megfelelő formára hajlítják. A rögzítópántok csak a hajlítás után kerülnek a helyükre, majd betegtájékoztatóval együtt csomagolják és szállítják az ortopéd-segédeszköz üzletbe világszerte.

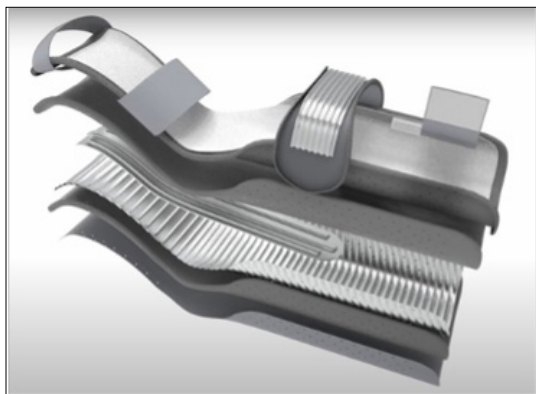
### 2.2. Röntgenmikroszkópos diagnosztika

Az orvosi eszközt röntgenmikroszkópos radiográfiai vizsgálatnak vetettem alá annak érdekében, hogy a használt ortézisek fémrészeinek roncsolódását vizsgáljam. A használt röntgenmikroszkóp típusa: DAGE XiDAT XD6600.

A mérés minden esetben 140 kV csőfeszültségen és 11 W teljesítményen történt.

Megállapítható, hogy a panaszolt töréseken és gyengüléseken túl, amelyek az eszköz csuklójánál flexio-extensio irányban történtek, több, nem ismert sérülést is találtam az orvosi eszközön. Megállapítható továbbá, hogy a perforálások sok helyen feszültséggyűjtő pontként szolgálnak, és a példák alapján feltételezhetően ezekből a perforációkból indulnak ki a repedések. A röntgenfelvételek segítségével pontos képet kaptam az ortéziseken belüli rétegek illesztéséről és darabszámáról.

A termék, melyet az **1. ábra** szemléltet, kétfajta lemezből (vastagságuk 0,2 mm és 1,1 mm) lett összeállítva szegeccses rögzítéssel. A vékonyabb lemez a karra történő ráhajlítást biztosítja, a vastagabb pedig a tényleges rögzítésért felel. A röntgenmikroszkópos képen azonnal kivehető volt, hogy a használt termék a csukló magasságában, teljes szélességében el van törve. A panaszolt eszközön a határozott törés csak a vastagabb, 1,1 mm



**1. ábra.** Robbantott ábra a palmáris alkarsín rétegeiről [5]

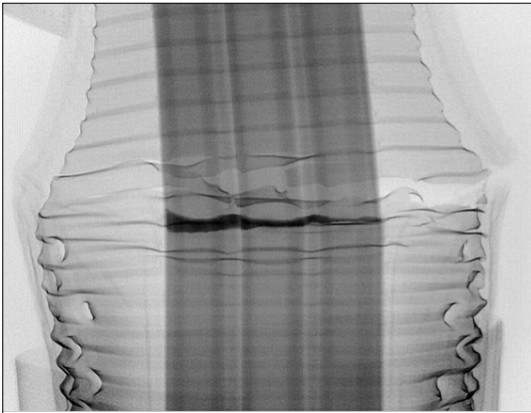
vastagságú merevítőlemez érintette. A vékony, 0,2 mm vastagságú, hullámosított alumínium a terhelés hatására csak részlegesen, illetve a fásztolt eszköz esetében egyáltalán nem is tört el (2. ábra).

Ebből a tulajdonságból arra lehet következtetni, hogy a vastag merevítőlemez ridegebben viselkedik, így a kifáradással szemben kevésbé ellenálló.

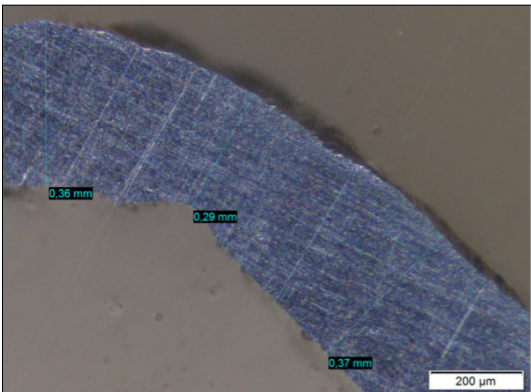
Nagyobb nagyításban készült képről, sztereomikroszkóppal vizsgálva kiderül, hogy ez a törés nem tisztán fáradásos törés. A törés második fázisában statikus szakadás is közrejátszott a roncsolódási folyamatban.

### 2.3. A hullámosított alumínium merevítőlemez vizsgálata

Az ortézisekben lévő, hullámosított alumíniumlemez vizsgálatához egy, a Lot: 76 jelzésű, 0,4 mm vastagságú alumíniumszalagból származó, a gyárban hullámosított lemez egy darabjából készítettem műgyantába ágyazott csiszolatot.



2. ábra. A palmáris alkarcsín csuklóí törött részéről készített röntgenkép



3. ábra. A lemez profiljának vizsgálata során mért vastagsági értékek

Az első, szembetűnő észlelésem az, hogy már kis nagyítás mellett is lemérhető, hogy a hullámosított alumíniumlemez profilja nem szimmetrikus, azaz nem szinuszgörbe alakú.

Az alumíniumprofilban nem várt bemélyedések vannak. Mivel ez a jelenség minden hullámnál ugyanazon a részen látható, arra következtettek, hogy a hullámosító szerszámban található egy kidudorodás vagy egy megmunkálási hiba. A csorbult helyeken az alumínium 7–8  $\mu\text{m}$ -rel vékonyabb, mint egyéb területeken (3. ábra). Ezek a csorbulások és elvékonyodások feszültséggyűjtő helyekként funkcionálnak. Ezek a részek nagyobb valószínűséggel keletkezhetnek repedések s majd törések. A hullámok alján hosszanti irányban végigfut egy kisebb mélyedés. Ez a mélyedés minden hullámon jelen van, így arra következtettek, hogy a hullámosító berendezés teljes hosszában valamilyen szerszámhiba van.

### 2.4. A fásztólvizsgálat ismertetése

A kisciklusú fásztólvizsgálat azt bizonyítja, hogy a feszültséggyűjtő helyek környezetében képlékeny alakváltozást szenvedett az anyagrés. Ezek a helyeken a feszültség minden ciklusban túllépi a folyáshatárt. Ilyenkor jellemzően a törésig elviselt terhelési ciklusok száma kevesebb mint 10 000 [6].

A fásztólvizsgálatot egy, a BME Biomechanika Kutatóközpont által biztosított, INSTRON 8872 típusú, szervohidraulikus terhelőgéppel végeztem a 4. ábrán látható készülékbe fogva az ortézist. A gép maximális terhelhetősége 20 000 N, keresztfejmozgási sebességtartománya 0,001–1000 mm/min.



4. ábra. Az ortézis a fásztólvizsgálathoz kialakított készülékben



A fárasztóvizsgálatot két részletben végeztem el. Először gyorskötözős rögzítés nélkül, 1 Hz vizsgálati frekvenciával, 10 mm pozíciószabályozással, kb. 400 ciklus időtartamig terheltem az eszközt. Ez a módszer nem bizonyult alkalmasnak. A második módszer volt a gyorskötözővel való rögzítés (4. ábra). Ebben az esetben valós terhelésnek tettem ki a sánt kb. 1500 cikluson át, 2 Hz frekvenciával, szintén 10 mm pozíciószabályozás mellett. A kiértékelést csak a valós terhelést szimuláló, második befogási módszert használó vizsgálatra végeztem. Az eredmények kiszámítására és a grafikonok elkészítésére MATLAB 2021 (The Math Work, Inc., Massachusetts, USA) szoftvert használtam.

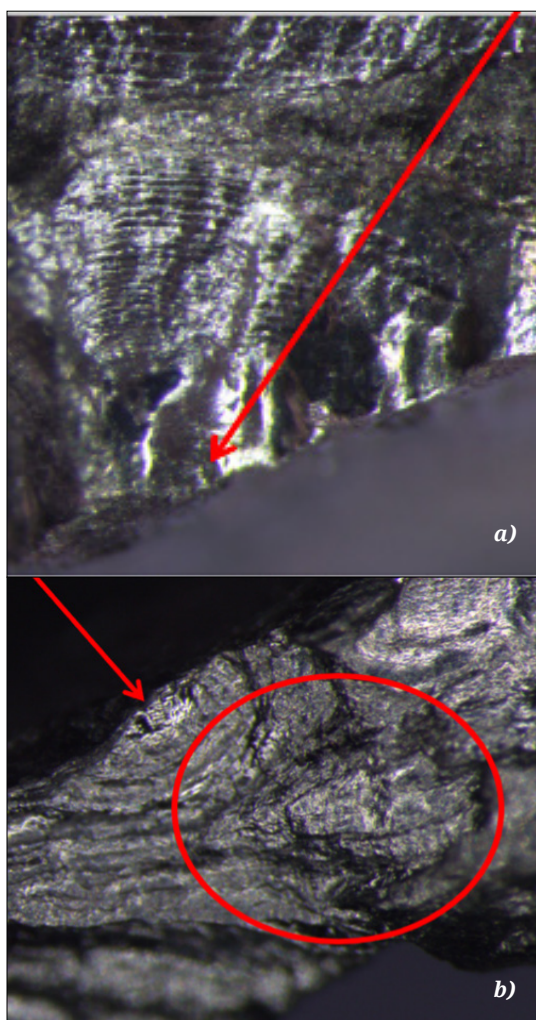
A pozíció minden esetben lefelé és fölfelé is 10-10 mm-rel változik 15 mm-es offset mellett. A mérést kevesebb mint 800 másodpercig végeztem.

Az erő a kifáradás során az időben szinuszgörbe szerint változik és sokszor ismétlődik. A kezdeti szakaszon történt az anyag rugalmas viselkedésének fokozatos elvesztése, és kialakultak azok a károsodások az alumínium merevítőlemezben – alakítási keményedés, helyi elvékonyodás –, amelyekből később a repedések keletkeztek. Kezdetben 120 N terhelés kellett ahhoz, hogy 10 mm-t el tudjon mozdulni a nyomófej. Ekkora ellenállási erőt fejtett ki az ortézis a gépre. Ezek után egy hosszú szakaszon beáll a maximális ellenállási érték körülbelül 80 N értékre, majd megkezdődik a törés szakasza. A teljes törés a 850. ciklusnál következett be. Itt állt be az ellenállási görbe a maximális 40 N értékre. Ez az ellenállás csupán a hibrid szerkezetben lévő szöveteknek köszönhető.

A töretfelületek makrofraktográfiai vizsgálata sztereomikroszkóppal történt. A fárasztott eszköz esetén biztosra mondhatjuk, hogy a sín fáradásos törést szenvedett. Az így kapott töretfelületeket összehasonlítottam a panaszolt eszköz felületével.

Általánosságban elmondható mindkét eszközről, hogy a merevítő alumíniumlemez egyenetlen vastagságú. A hajlított részeken előfordul, hogy akár 0,3 mm-rel is vékonyabb, mint az egyeneseknél. Mivel egy alapvetően egyenetlen keresztmetszetet vizsgálok, akár több repedésképződési helyre is kell számítani. A repedés a ciklikus mozgás által keletkező diszlokációk irreverzibilis mozgása, az alakváltozások és a mikroüreg-képződés következtében jön létre. Ilyenkor a teherviselés lecsökken, és akár más helyen is folytatódik az alakváltozás. A létrejött repedés azonban terjed, vagyis a repedéscsúcs halad. Repedésképződési pontokat mutat az 5. ábra a) a fárasztott és az 5. ábra b) a panaszolt sín esetében. A mikroszkálás kiterjedésű repedés abban az esetben, ha a szomszédos kristallit is megfelelő helyzetű, tovább terjed. Miután a mikrorepedés elér egy bizonyos nagyságot, makroszkálás méretűvé válik (a makroszkála a kb. 1 mm-nél nagyobb kiterjedések tartománya). Innentől kezdve inkább a húzó igénybevételek fogják jobban szabályozni a terjedését, nem pedig a nyírófeszültségek. A repedés többnyire a legnagyobb húzófeszültségre merőleges síkba fordul és terjed tovább. Mivel a repedés a ciklikus terhelés hatására növekszik, a kialakult töretfelületen is észrevehető a ciklikusság szabályos barázdák formájában.

zódési pontokat mutat az 5. ábra a) a fárasztott és az 5. ábra b) a panaszolt sín esetében. A mikroszkálás kiterjedésű repedés abban az esetben, ha a szomszédos kristallit is megfelelő helyzetű, tovább terjed. Miután a mikrorepedés elér egy bizonyos nagyságot, makroszkálás méretűvé válik (a makroszkála a kb. 1 mm-nél nagyobb kiterjedések tartománya). Innentől kezdve inkább a húzó igénybevételek fogják jobban szabályozni a terjedését, nem pedig a nyírófeszültségek. A repedés többnyire a legnagyobb húzófeszültségre merőleges síkba fordul és terjed tovább. Mivel a repedés a ciklikus terhelés hatására növekszik, a kialakult töretfelületen is észrevehető a ciklikusság szabályos barázdák formájában.



5. ábra. a) A fárasztott és a panaszolt (b) ortézis proximális töretfelületén lévő repedésképződési hely, nyíllal jelölve

Mindkét fenti ábrán jól láthatóak a félköríves barázdák, melyek a repedésképződési ponttól lefele irányba növekednek. A fárasztott eszköz esetén valószínűleg a fárasztás frekvenciája nagyobb volt, mint a panaszolt sín esetében, így több, egymáshoz közelebb lévő barázda alakult ki. A panaszolt eszköz esetén a barázdák távolabb helyezkednek el egymástól.

Miután a repedés eléri a kritikus méretet, a terjedés instabillá válik, és ekkor a darab valamilyen statikus töréssel eltörik. Azok a csúcsos domborulatok, amelyek az **5. ábra** b) bekarikázott részén láthatóak, a nyomó félciklusokban képlékeny alakváltozást szenvedtek, letompultak, így az eredeti fraktográfiai jegyeik eltűntek. Érdekes, hogy a fárasztott eszköz esetében olyan sűrűn keletkeztek repedések a szabályos ciklikusság következtében, hogy olykor a több irányból kiindult félköríves barázdák egymást érik. A fáradással szembeni ellenállást a felületi réteg mechanikai (görgözés, szórás) vagy termokémiai keményítése (nitridálás), illetve a felület bevonatolása (pl. PVD) javíthatja. A gyárban az alumíniumlemezekre a polifóm bevonat rásütését nem tekinthetjük hőkezelésnek.

### 2.5. Az alumínium merevítőlemez keménységének vizsgálata

A keménységméréssel az anyag mechanikai jellemzőit jó közelítéssel meghatározhatjuk, illetve összehasonlító adatokkal szolgálhatunk a szakítóvizsgálattal nyert adatokhoz [4]. A mért adatok megközelítőleg 40 HV értékek. A DIN EN ISO 18265:2004 szabvány szerinti táblázatból arányosan következtetve a 40 HV érték körülbelül 125 MPa szakítószilárdságnak felel meg. Ez az érték a lemez műbizonylatában előírt 105–145 MPa intervallumon belül van, így az anyag megfelelő.

### 2.6. Az alumínium merevítőlemez pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata

A pásztázó elektronmikroszkóp olyan berendezés, amely jól fókuszált elektronnyalábbal pásztázza végig a vákuumba zárt minta felületét. A mintából kilépő szekunder vagy visszaszórt elektronok, illetve röntgensugárzás segítségével a berendezés képes leképezni a beállításoknak megfelelően a minta felszínét oly módon, hogy a mintáról kapott jellel moduláljuk egy, a mikroszkóp elektronnyalábjával szinkronban működő katódsugárcső fényintenzitását. Ezzel a technikával több mint 16 000-szeres nagyításban tudunk képet alkotni a mintáról [7].

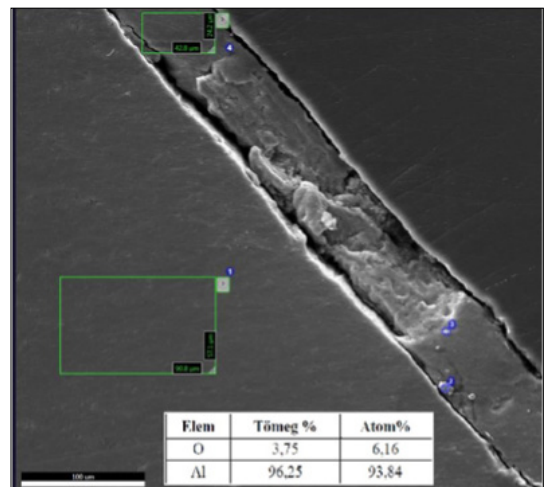
A vizsgálataimhoz ZEISS EVO MA10 pásztázó elektronmikroszkópot használtam. A gépet szekunderelektron-detektor üzemmódban, standard 20 kV-os gyorsítófeszültségen, 200 pA-es anóáramon és körülbelül 10 mm-es munkatávolságon használtam. A készült képek alapján megállapítható, hogy a lemezben nem találhatóak zárványok, idegen anyagok, repedések vagy megszakadások. Azaz a lemez anyaga homogénnek tekinthető. A merevítőlemez anyagának vizsgálata energiadisziperzív röntgenspektrométerrel (EDS) is megtörtént.

A mérés bizonyította, hogy a lemez kizárólag alumíniumot tartalmaz, mivel az oxigéncsúcs a felületen megtapadt molekulák okozta műtermékek tekinthető: ebben az esetben is a levegővel való érintkezés miatt található meg a mintában.

### 3. Következtetés

A felhasználói reklamációk alapján vizsgálatra kapott kézi ortézisek merevítőlemezének vizsgálatával olyan jellegzetességeket is sikerült feltárni, amelyek a gyártás okozta hibáknak tekinthetők, és bizonyosan rontják a merevítőlemez kifáradással szembeni ellenálló képességét. Ezt a felfedezést a gyártás fejlesztési folyamatában fel lehet használni.

A keménységvizsgálat alapján kijelenthető, hogy az eszköz szakítószilárdsága megfelel az előírtaknak. A követelményeknek való megfelelést igazolja az EDS által mért anyagösszetétel is. A fárasztóvizsgálatnak alávetett eszköz károsodása



**6. ábra.** A vizsgált minta egy részletének pásztázó elektronmikroszkópos képe, valamint az EDS által mért anyagösszetétel táblázatosan

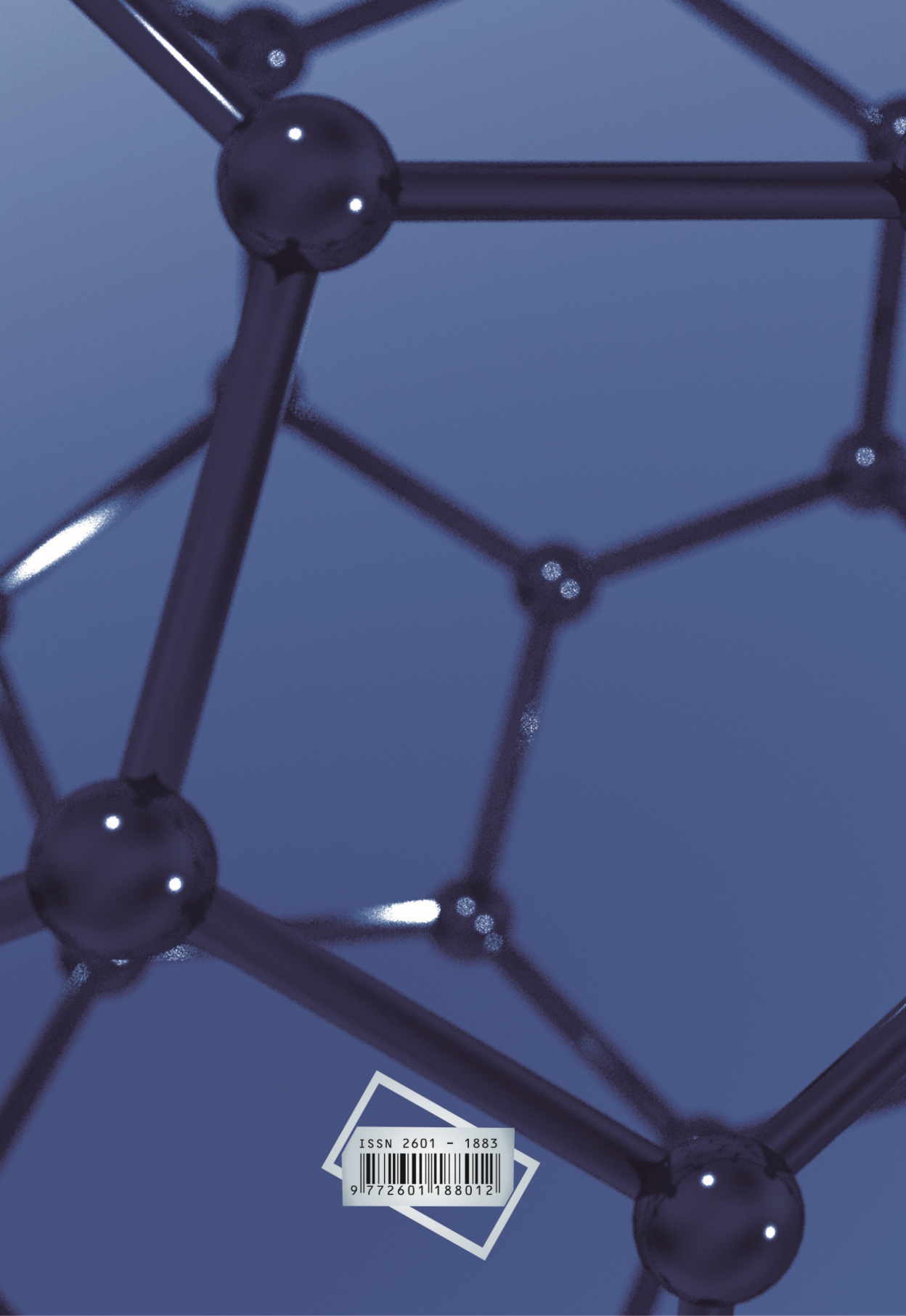
bizonyítja, hogy a panaszolt eszköz mikromozgások általi fáradásos törést szenvedett. A mért adatok alapján kb. két hét rendeltetésszerű használat mellett az eszköznek nem szabad eltörnie. Egyértelműen megállapítható tehát, hogy a felhasználó nem tett eleget a túlterhelés elkerülése érdekében meghatározott felhasználási feltételeknek.

### Köszönetnyilvánítás

A kutatás elvégzéséhez hozzájárult témavezetőm, Dobránszky János, a Polimertechnika Tanszék, a Biomechanikai Kooperációs Kutatóközpont és az Anyagtudomány és Technológia Tanszék dolgozói. Valamint köszönettel tartozom a BME Elektronikai Technológia Tanszék (ETT) hibaanalitikai laboratóriumában dolgozóknak a röntgenmikroszkóp használatáért. Továbbá köszönöm Mersitz Péternek, a Chrisofix Kft. főmérnökének a támogatását és a rendelkezésemre bocsátott eszközöket.

### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Haarman Claudia J. W., Hekman Edsko E. G., Rietman Hans S., Kooij Herman van der: *Pushing the limits: A novel tape spring pushing mechanism to be used in a hand orthosis*. In: Carrozza M. C. et al. (eds.): WeRob 2018, BIOSYSROB 22, Springer Nature Switzerland AG, 2019. 475–479. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01887-0\\_92](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01887-0_92)
- [2] Titus S. Hansen, Bitikofer Chris K., Sobbi Bahram E., Perry Joel C.: *Design of mobile digit assistive system (MIDAS): A passive hand extension exoskeleton for post stroke rehabilitation*. In: Haarman Claudia J. W., Hekman Edsko E. G., Rietman Hans S., Kooij Herman van der: *Pushing the limits: A novel tape spring pushing mechanism to be used in a hand orthosis*. In: M. C. Carrozza et al. (eds.): WeRob 2018, BIOSYSROB 22, 2019. 535–539. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01887-0\\_104](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01887-0_104)
- [3] László Gábor, Fűrész József, Sandra Sándor, Bolla Kálmán: *A mozgást a gipszhez hasonló mértékben gátló ortézis terápiás hatásosságának vizsgálata CMC I ízület arthrózisa esetén*. A Magyar Reumatológusok Egyesületének éves vándorgyűlése, 2017. szeptember, Siófok.
- [4] BME ATT: Keménységmérés laboratórium szillabusz
- [5] Chrisofix. (letöltve: 2022. július 26.) <https://chrisofix.com/hu/project/universal-resting-shell-orthosis-for-hand-wrist-tenosynovitis-night-use/>
- [6] Anyagvizsgálat (letöltve: 2022. július 28.) [http://www.sze.hu/~hargitai/Anyagvizsg%E1lat/5\\_kifaradas.pdf](http://www.sze.hu/~hargitai/Anyagvizsg%E1lat/5_kifaradas.pdf)
- [7] Pozsgai Imre: *A pásztázó elektronmikroszkópia és az elektronsugaras mikroanalízis alapjai*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 1995.



ISSN 2601 - 1883



9 772601 188012