

ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA

Anyagtudományi közlemények

1. évfolyam, 2018. 2. szám



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET
Kolozsvár
2018

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



Főszerkesztő / Editor-in-Chief: Bitay Enikő

Nemzetközi Tanácsadó testület / International Editorial Advisory Board:

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

Lapszámszerkesztők / Editorial Board:

Gergely Attila, Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhely, Románia
Forizs Edit, Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár, Románia
Kovács Tünde, Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország
Orbulov Imre, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi 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

Műszaki szerkesztő / DTP: Szilágyi Júlia

Borítóterv / Cover: Kőnczey Elemér

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

Copyright © a szerzők / the authors, EME/ TMS 2018

ISSN 2601-1883, ISSN-L 2601-1883

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

A folyóirat honlapja / The journal webpage: <http://www.eme.ro/publication/acta-mat/mat-main.htm>

Az *Acta Materialia Transylvanica. Anyagtudományi Közlemények* az Erdélyi Múzeum-Egyesület (EME) Műszaki Tudományok Szakosztályának folyóirata, amely az anyagtudományok területéről közöl tudományos közleményeket: szakcikkek, 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 közzé tesszük.

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

BITAY Enikő, KACSO Irén, PÁNCZÉL Szilamér Péter, VERESS Erzsébet	65
<i>A mikházi római segédcsapattábor és település területén feltárt római kori vassalakok összehasonlító vizsgálata</i>	
<i>Comparative Study of Roman Iron Slags Discovered in the Roman Auxiliary Fort and Settlement of Călugăreni</i>	
FEJES Gergő Richárd, GONDA Viktor, SZÉLL Károly	73
<i>DSC-mérés során megjelenő újrakristályosodási csúcs vizsgálata</i>	
<i>Analysis of Recrystallization Peak Occuring During DSC Measurement</i>	
HARASZTI Ferenc	77
<i>Termográfiai vizsgálat alkalmazása a villamosiparban</i>	
<i>Thermographic Inspection in the Electric Industry</i>	
KEMÉNY Dávid Miklós, KÁROLY Dóra	81
<i>Additívan gyártott fém alapanyagok és orvostechikai eszközök korróziójának vizsgálata</i>	
<i>Corrosion Examination of Additive Manufactured Metals and Biomedical Equipments</i>	
KENÉZ Attila Zsolt, BAGYINSZKI Gyula	85
<i>Gyémánt fúrószegmensek lézeres hegesztésének vizsgálata</i>	
<i>Investigation of Laser Welding Technology of Diamond Drilling Segments</i>	
KÓNIA János, KULCSÁR Klaudia	89
<i>A fogászatban használt kobalt-krom alapú vázszerkezetek additív és szubsztraktív együttes gyártása</i>	
<i>The Addictive and Subtractive Combined Making of Cobalt-Crome-Based Frames in Dentistry</i>	
KOVÁCS Tünde, NYIKES Zoltán, Lucia FIGULI	93
<i>Nagy energiaelnyelő képességű anyagok alkalmazása robbanás elleni védelemre</i>	
<i>Testing of High Energy Absorbing Materials for Blast Protection</i>	

KULCSÁR Klaudia, KÓNYA János	97
<i>A fogtechnikai gyakorlatban használt 3D nyomtatott kobalt-króm ötvözet hőkezelésének befolyása a mechanikai tulajdonságokra</i>	
<i>The Influence of Heat Treatment on the Mechanical Properties of 3D-Printed Cobalt-Chrome Alloy Used in Dental Laboratory Practice</i>	
MALOVECZKY Anna, KARAI Ambrus	101
<i>Az ellenállás-hegesztés lézersugaras hegesztéssel való kiválthatóságának lehetőségei</i>	
<i>The Replacement of Resistance Welding with Laser Beam Welding</i>	
RÁTHY Istvánné, PINKE Péter, HUSZÁK Csenge	105
<i>PP mátrixú fröccsöntött kompozitok mechanikai vizsgálatai</i>	
<i>Mechanical Studies of Injection Molded Composites with PP Matrix</i>	

A mikházi római segédcsapattábor és település területén feltárt római kori vassalakok összehasonlító vizsgálata

Comparative Study of Roman Iron Slags Discovered in the Roman Auxiliary Fort and Settlement of Călugăreni

Bitay Enikő,¹ Kacsó Irén,² Pánczél Szilamér Péter,³ Veress Erzsébet⁴

¹ Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Marosvásárhely, Románia, ebitay@ms.sapiientia.ro

² Izotóp és Molekuláris Technológiai Kutatóintézet (INCDTIM), Kolozsvár, Románia, iren.kacso@gmail.com

³ Maros Megyei Múzeum, Marosvásárhely, Románia, pszilamer@yahoo.com

⁴ Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, Románia, veresserszsebet@gmail.com

Összefoglalás

A római Dácia keleti határán, a mikházi (Călugăreni) segédcsapattáborban és katonai településen végzett régészeti feltárások során előkerült vassalakminták makroszkópos és optikai mikroszkópos (OM) jellemzőit, továbbá a minták FTIR spektroszkópiai vizsgálatának eddig nyert eredményeit elemezzük az eltérő származású vassalakok összehasonlító értékelése érdekében. A friss feltárások során nagy mennyiségű korabeli vastárgy mellett számos vassalaktöredék került a felszínre. Jelen dolgozatunk a helyszínről származó 17 vassalakminta adatait vizsgálja.

Kulcsszavak: vassalakelemek, makroszkópos jellemzés, optikai mikroszkópia, FTIR.

Abstract

Iron slag samples unearthed at the eastern border of Roman Dacia, in the auxiliary fort and the military settlement of Călugăreni (Mikháza) are investigated by macroscopic inspection, optical microscopy (OM) and FTIR spectroscopy in order to comparatively characterize their macro- and microstructure as well as their mineralogical composition. During the recent archaeological excavations, a large number of iron artefacts were discovered together with a great quantity of iron slag fragments. The present paper focuses on the data obtained from 17 slag samples.

Keywords: iron slags, macroscopic investigation, optical microscopy, FTIR spectroscopy.

1. Bevezető

A rómaiakat többek között a gazdag érc- és sóbányák megszerzése készítette Dácia meghódítására. A II. század elején a legyőzött Dák királyság területén római tartományt szerveztek, amely a III. század első feléig tartó gyors fejlődésnek indult. A hódítás után elkezdődött az új tartomány határvédelmi rendszerének (*limes*) a Római Birodalom más részeiről ismert módon való kialakítása is. A határvonalra, a körkörös védelmi rendszer külső védelmi vonalára elsősorban segédcsapatok kerültek [1, 2], míg a terület bel-

sejében segédcsapatok mellett légiós csapatok is állomásoztak. A barbár betörések gyakorisága, a birodalom gazdasági és politikai instabilitása miatt végül Aurelianus császár a 270-es évek elején feladta a tartományt, és a dunai védelmi vonalra vonta vissza a hadsereget.

A mai Maros megye területén húzódó egykori római határszakaszon három segédcsapattábor ismerünk, a hozzájuk tartozó polgári településekkel egyetemben, ezek a mai Marosvécs (Brâncovenesti), Mikháza (Călugăreni) és Sóvárád (Sărățeni) területén találhatóak.

A mikházi segédcsapattábor a Nyárad völgyének védelmében töltött be fontos stratégiai szerepet. A II–III. század folyamán a több mint negyvenhektáros település a Nyárad völgye legfontosabb gazdasági és katonai központja volt. A régészeti kutatások és a geofizikai mérések alapján a település szívében levő 2,3 hektár alapterületű, téglalap alakú, ÉK–DNY tájolású katonai tábor (*castrum/castellum*) alaprajza és beosztása szigorúan követte a római tábori építészet szabályait [3, 4]. A körülötte kialakult polgári település (*vicus militaris*) a mai falu nyugati része, illetve a Mikháza és Deményháza közötti szántóföldek alatt van (1, 2 ábra) [3, 4].

A jelenleg is folyó tervásatások fő célja a castrumbeli főutak kereszteződésénél álló parancsnoki épület (*principia*), illetve a vicus egyes maradványainak kutatása.

2. Kísérleti rész

2.1. A salakminták rövid jellemzése

A vizsgált vassalakminták (1. táblázat) nagyjából a mikházi 2013-as és 2014-es régészeti feltárásokból származnak. Ezek a vicusban feltárt lakóépületek, illetve a hozzá tartozó gazdasági épületek omladékából (C, C1, C2 ásatási szelvények) kerültek elő. A 2015 utáni leletek (A2, A5, A2016, A6 szelvények) a katonai tábor parancsnoksági épületének (*principia*) késői (III. sz.) fázisához tartoznak. Kiválasztásuk tekintetében az elsődleges szempont minden esetben a régészeti relevancia volt, ugyanakkor elegendő mennyiségben rendelkezésre kellett állniuk a tervezett vizsgálatok elvégzéséhez.

A makroszkópos jellemzéshez a mintákat szabad szemmel, nappali fényben, 5x-ös nagyításban



1. ábra. A vicus (1) és a segédcsapattábor (2) területén folyó feltárások (Készítette: Laczkó N.)



2. ábra. A lelőhely virtuális rekonstrukciója (Készítette: Vassáros Zs.)

1. táblázat. A vizsgált vassalakminták

No.	Leltári szám	Ásatási szelvény	Kontextus-szám	Ásatási év
Ásatási helyszín: vicus				
1	2008	C	2000	2013
2	2155	C	2001	2013
3	2318	C	2005	2013
4	2342	C	2005	2013
5	2355	C	2009	2013
6	2356	C	2009	2013
7	4009	C2	2039	2014
8	4137	C1	2034	2014
9	4169	C2	2039	2014
10	4222	C1	2038	2014
11	4251	C1	2035	2014
12	4264	C1	2038	2014
Ásatási helyszín: principia				
13	10218	A2	109	2015
14	10532	A5	250	2016
15	10661	A5	339	2016
16	10673	A2016	346	2016
17	11145	A6	443	2017

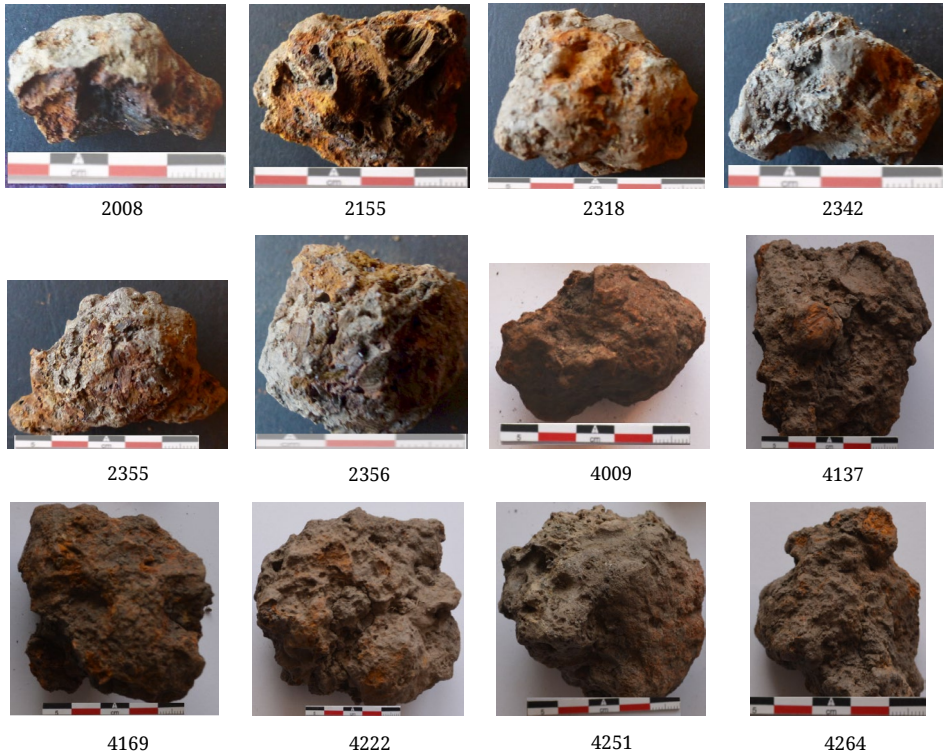
vizsgáltuk, a makrofotók a **3. és 4. ábrán**on láthatók.

A minták viszonylag kis száma nem engedi meg a lelőhely, ásatási szelvény, kontextus szerinti csoportosítást makroszkópos jellemzőik alapján.

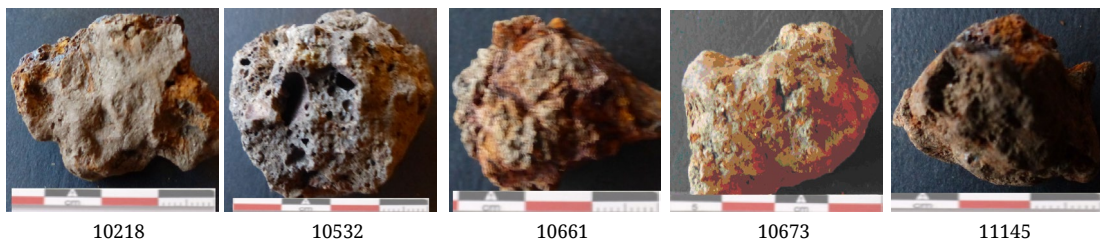
A vicus területéről gyűjtött minták nagy része részlegesen üvegesedett, külső felülete jellemzően sötétebb szürke, illetve feketés zónákat tartalmaz, kisebb-nagyobb mennyiségű fémvas „gyönggyel”.

A 2008., 2155., 2355., 2356., 4009., 4264. minta szivacsos, könnyű, erősen buborékos, habkőszerű. Szembetűnően heterogének, felületükön szürkés, vöröses, feketés, agyagos-sárgás zónák és üveges részek láthatók. A legtöbb mintában beágyazódott fekete magnetitkristályok is vannak. Minden minta számos apróbb-nagyobb fémcsépet (vasat) tartalmaz. A buborékok, repedések mélye általában feketés, fémgöngy „fészkekkel”.

A hasonlóan heterogén 4137., 4169. és 4222. minta szerkezete tömörebb. Sokkal keményebbek és nehezebben poríthatók, belsőjük jellemzően sötétszürke-feketés. A 4137. minta szendvics szerkezetű, 3–4 mm vastag külső terrakotta színű héja alatt 3–4 mm vastagságú fekete réteg burkolja a terrakotta belsőt.



3. ábra. A vicus területéről gyűjtött minták makrofotói



4. ábra. A principia területéről gyűjtött minták makrofotói

A principia területéről származó minták makroszkópos jellemzőikben a vicusbeli csoporttól részben eltérnek. A 10218. tömörebb, számos apró buborékkal. Réteges szerkezetű: külső rétege agyagos, porlik, a belső rész feketés-üveges, kemény, nehezen törhető, sok apró fémgönggyel. A 10532. minta is tömörebb, nagy buborékokkal. Könnyen törik, de nehéz porítani. Kívül-belül sötétszürke, a nagy üregek üveges mélyén „fészekben” kivált fémgönggyökkel. A tömörebb 10661. minta keményebb (nehezebb porítani), de töredezett (lemezesen hasad). Felülete szürke, belseje vöröses agyagos, a feketés repedések mélyén kevés apró fémcsepp van. A 11145. minta könnyű, közepesen buborékos, szivacsos, könnyen porítható (lemezesen-hasábosan törik). Felülete szürke, belső része vöröses-agyagos, lemezes szerkezetű, fehér zárványokat, kevés fémgönggyöt tartalmaz.

2.2. A minták vizsgálata. Eredmények

2.2.1. Optikai mikroszkópia

Az optikai mikroszkópos (OM) vizsgálat [5, 6] során a minták kezeletlen felületéről, illetve friss, csiszolatlan töretéről Dino-Lite Edge AM4115T típusú, polarizáció nélküli digitális mikroszkóp és DinoCapture 2.0 képfeldolgozó program segítségével 500× nagyítású mikrofotókat készítettünk. A legjellemzőbb mikrofotókat az 5. és 6. ábrán tettük közzé.

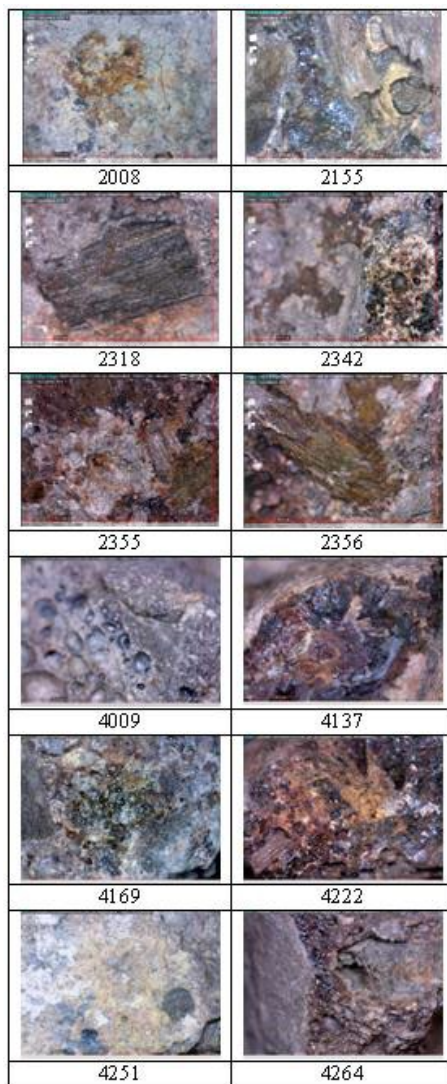
A mikrofelvetelekről leolvasható ásványtani adatok kiértékelése folyamatban van, egyes megállapítások azonban már tehetők.

A minták mindegyike gázbuborékos, de a buborékok mérete és sűrűsége az egyes minták esetében jelentősen különbözik. Minden mintára jellemző az egyes esetekben meghatározó jellegű fémszemcse (fémvas) kiválás, kisebb mennyiségben tartalmaznak magnetitkristályokat is.

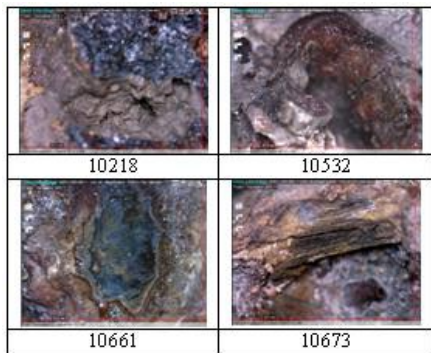
A jól kristályosodott mintákban könnyen azonosítható a fayalit és a wüstit fázis. [7]

2.2.2. FTIR-spektroszkópia

A régészeti vassalakok FTIR-spektruma a lelet keletkezése és földbe kerülése során végbement folyamatok tisztázásának hasznos eszköze [8–10].



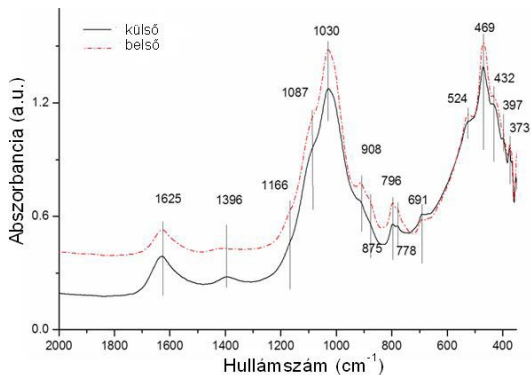
5. ábra. A vicus területéről származó minták jellemző mikrofotói (nagyítás: 500×)



6. ábra. A principia területéről származó minták jellemző mikrofotói (nagyítás: 500x)

A szabad és kötött OH által generált, 3700–3000 cm^{-1} közötti, jellemzően széles, általában közepes intenzitású elnyelési sáv és az 1100–1000 cm^{-1} közötti nagy intenzitású, széles, közel szimmetrikus (alumino)szilikát sáv együttesen megbízhatóan utal a szerkezeti rendezettségre: a salakolvadék lehűlésekor végbement kristályosodásra, illetve a földbe kerülés során elszennvedett környezeti hatások következtében való degradálódásra, a sávok dekonvolúciója révén azonosítható komponensek pedig megerősít(het)ik a közettani mikroszkópia és a röntgendiffraktometria adataiból következő ásványösszetételt, különösen a makrolemi összetétel ismeretében.

A hőkezelés nélküli vassalakmintákat achátmoszárban porítottuk. Az FTIR-spektrumok felvétele 1 cm^{-1} felbontású JASCO FTIR-6100 spektrométerrel történt. A homogenizált bulk összetételnek megfelelő spektrumok KBr pasztillákon készültek, a 4000–400 cm^{-1} hullámszámtartományban. A vicusból származó 4009–4264. mintacsoport



7. ábra. A salakok felületi rétegének és belsejének FTIR-spektruma a 2000–400 cm^{-1} tartományban (4009 minta, vicus)

felületi rétegét és a belsejét külön is vizsgáltuk (7. ábra, 2. táblázat).

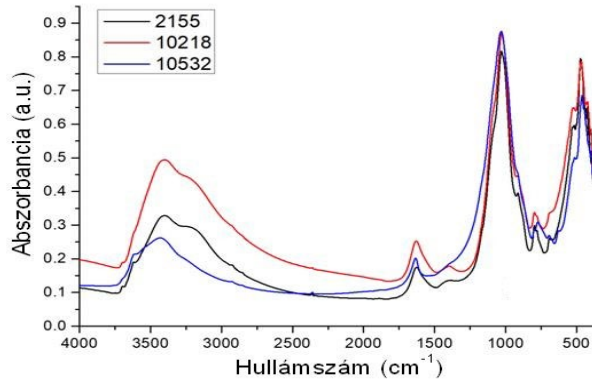
Három, régészetileg érdekes salaklelet (a vicus területén előkerült 2155., és a principia területén talált 10218. és 10532. minta) FTIR-vizsgálata kiterjedt a teljes spektrumtartományra (8. ábra, 3. táblázat). Mivel azonban az eddigi eredmények (főleg a szabad és kötött OH által meghatározott) 4000–2000 cm^{-1} spektrumtartomány kielégítő értelmezését nem teszik lehetővé, jelen dolgozatban a többi minta esetében csak az FTIR-spektrumok 2000–400 cm^{-1} hullámszámtartományát tárgyaljuk.

A 2000–400 cm^{-1} hullámszámtartományban a 4009. minta 7. ábrán látható spektrumaihoz hasonlóan a minták külső rétegének és belsejének abszorpciós sávjai gyakorlatilag egybeesnek, jelezve, hogy bár kisebb geokémiai átalakulások minden bizonnyal végbemennek, ezeknek az adott esetben nincs döntő befolyásuk.

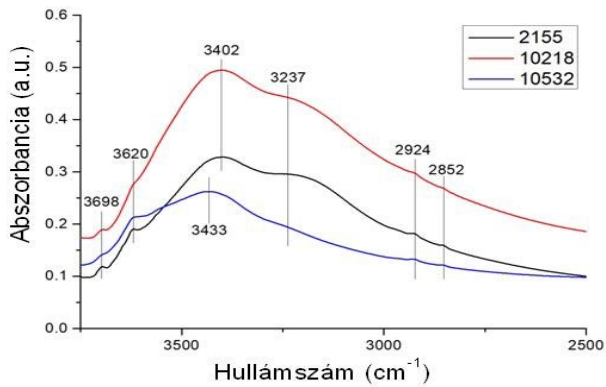
2. táblázat. FTIR-spektrumvonalcsúcsok (bulk) és hozzárendelések a 2000–400 cm^{-1} tartományban

Hullámszám (cm^{-1})						Hozzárendelések
4009	4137	4169	4222	4251	4264	
1630	1620	1625	1620	1627	1630	OH ⁺ FeO(OH)
1394 sh	1698	1396	1396	1394	1401	CO ₂
1167 sh 1076 sh 1045	1084 sh 1029	1166 sh 1087 sh 1030	1166 sh 1087 sh 1030	1094 sh 1025	1165 sh 1080 sh 1023	SiO ₄ , AlO ₄ domináns FeO(OH) 1084
913 876	882	908 875	908 875	906 sh	913 sh	Fe ₂ O ₃ 1100 CO ₂ 880-860
794 776	796 779	796 778	796 778	798	796 778	SiO ₄ , AlO ₄ domináns FeO(OH) 803
524 462 421	526 467 435	524 469 462 sh	524 469 462 sh	524 sh 467 428	526 sh 471 421	Fe ₂ O ₃ 550, 417 FeO(OH) 470, 410 Si-O, Al-O, 470-460

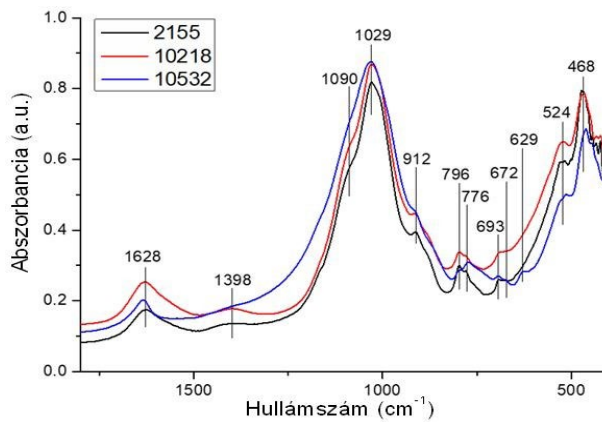
a)



b)



c)



8. ábra. A részletes vizsgálatra kiválasztott salakok FTIR-spektruma. Hullámszámtartomány: (a) 4000–400 cm^{-1} , (b) 4000–2500 cm^{-1} , (c) 2000–400 cm^{-1}

3. táblázat. A részletes vizsgálatra kiválasztott salakok FTIR-adatai a teljes hullámszámtartományban

Hullámszám (cm ⁻¹)			Hozzárendelések
2155	10218	10532	
3618	3621	3616	OH
		3549	
3401	3403		
3221	3220	3243	
2923	2924	2914	
2853	2851	2854	
1627	1629	1635	
1398	1398	1393	
1090	1090		SiO ₄ , AlO ₄ 1100-900 FeO(OH), Fe ₂ O ₃ 1105, 1084
1029	1030	1030	
912	915	914	
797	797	799	SiO ₄ 798-782, FeO(OH) 803
779	777	773	FeO(OH)
693	695	693	AlO ₄
		627	SiO ₄ 630
520	523	515	Fe ₂ O ₃
471	465	431	FeO(OH) 470 Fe ₂ O ₃ 432

A 4009–4264. mintacsoportra jellemző elnyelési frekvenciákat és a megfelelő hozzárendeléseket a **2. táblázat**ban foglaltuk össze, a részletes vizsgálatra kiválasztott három salakminta FTIR-adatait a teljes spektrumtartományra a **3. táblázat** tartalmazza.

A **2. és 3. táblázat** FTIR abszorpciók adatait a 2000–400 cm⁻¹ hullámszámtartományban összehasonlítva, lényegi eltéréseket nem találunk, bár kisebb-nagyobb különbségek természetesen akadnak. A megállapítás érvényes a 4009–4264. mintacsoportra nézve is (**2. táblázat**). Eddigi eredményeink alapján az újabb minták jó egyezést mutatnak a 2013-ban begyűjtött mintacsoporttal is, további megállapításokat azonban csak további adatok birtokában, a folyamatban levő XRD, XRF, ICP-MS-vizsgálatok lezárása után lehet tenni.

3. Következtetések

Mikháza katonailag jelentős pont volt a római limes Dácia keleti részében húzódó szakaszán. A jelenleg is folyó régészeti feltárások során nagy mennyiségű vassalakat találtak, eddig azonban sem kovácsműhely, sem bucakohó nem került elő, a salak tehát származhat import vasbucák feldolgozásából, vagy tönkrement vastárgyak (fegyverek, mindennapi használati tárgyak) javításából, alakításából is.

A kérdés tisztázására 17 vassalakmintát vizsgáltunk, a vizsgálatot a makroszkópos értékelés után optikai mikroszkópiával és FTIR-spektroszkópiával kezdtük.

A 2000–400 cm⁻¹ FTIR-spektrumtartományban jellemző módon jelentkező abszorpciók sávok alapján a minták kisebb mennyiségű karbonát (és feltehetően alumínát) mellett alapvetően szilikátokból állnak. A karbonát származhat a mintákat a földbe kerülés ideje alatt ért környezeti hatások következtében végbement karbonátosodásból is.

A mikrofotók alapján a fő kristályos ásványfázis minden esetben nagy valószínűséggel a fayalit (Fe₂SiO₄). A minták minden esetben nagy mennyiségű vasat tartalmaznak. Gyakorlatilag minden mintában előfordul magnetit is. Ennek alapján és az üveges fázis jelenléte szerint a minták a kovácslás (esetleg kohósítás) során (valószínűleg redukáló körülmények között) magas hőmérsékletnek voltak kitéve.

Az elkövetkező időszakban a kutatást a salakok ásványösszetételének közettani mikroszkópos és XRD-meghatározásával, illetve a teljes elemi összetételek meghatározásával folytatjuk.

Hasonló minták kémiai összetételének kézi XRF-spektrométerrel való meghatározása során a minta különböző felületi pontjainak adatai általában nagy szórást mutatnak [11, 12]. Ez, a megfelelő mintavétel jelentősége mellett, figyelmeztet arra, hogy a kémiai és/vagy ásványtani összetételre vonatkozó következtetésekben figyelembe kell venni a salakok erősen heterogén jellegét.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás az EME Műszaki és kulturális örökségvédelem Erdélyben program keretében valósult meg, az MTA Domus Hungarica szülőföldi csoportos pályázat kutatás támogatásával. Szerződésszám: 3272/4/2017/HTMT, 4039/5/2018/HTMT. 2013 és 2015 között a terepi kutatások a The Roman Limes as a European Cultural Landscape nevet viselő nemzetközi részvétellel zajló tanácsátás keretében valósultak meg. A Maros Megyei Múzeum és a

berlini Humboldt Egyetem koordinálta a régészettel, geofizikával, építészettel és konzerválással foglalkozó oktatók és egyetemi hallgatók együttműködését, melyben a Kölni Egyetem, a Pécsi Tudományegyetem, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, az ELTE, az erfurti Alkalmazott Tudományok Egyeteme, a kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetem és a marosvásárhelyi Petru Maior Egyetem vett részt. 2016 óta a Maros Megyei Tanács, a Kölni Egyetem Régészeti Intézetének Római Provinciális Régészeti Programja, a berlini Humboldt Egyetem Erasmus Alapja, valamint a romániai Kulturális Minisztérium támogatásával végeztek régészeti kutatásokat.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Matei-Popescu F., Țentea O.: *The Eastern Frontier of Dacia. A Gazetteer of the Forts and Units*. In: *Orbis Romanus and Barbaricum. The Barbarians around the Province of Dacia and Their Relations with the Roman Empire*. (Szerk.: Bârcă V.). Mega Publishing House, Cluj-Napoca, 2016. 7–24.
- [2] Höpken C. et al.: *Wachtürme am Dakischen Ostlimes zwischen Brâncovenesti und Călugăreni (jud. Mureş / RO)*. *Archäologisches Korrespondenzblatt* 46. (2016) 241–254.
- [3] Pánczél Sz. P.: *The Roman Fort from Călugăreni (Mureş County, Romania)*. In: *LIMES XXII. Proceedings of the 22nd International Congress of Roman Frontier Studies Ruse, Bulgaria, September 2012*. (Szerk.: Vagalinski L., Sharankov N.). National Archaeological Institute with Museum, Sofia, 2015. 909–916.
- [4] Pánczél Sz. P. et al.: *A mikházi római segédcsapattábor kutatása / The research at the Roman auxiliary fort of Mikháza/Călugăreni*. *Magyar Régészet/Hungarian Archaeology*, 2018 tavasz/spring, 13–20.
http://files.archaeolingua.hu/2018TA/Pa%b-4ncze%b4l_E18TA.pdf
- [5] Buchwald V. F., Wivel H.: *Slag analysis as a method for the characterization and provenancing of ancient iron objects*. *Materials Characterization*, 40. (1998) 73–96.
[https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(97\)00105-8](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(97)00105-8)
- [6] Kramar S. et al.: *Mineralogical and geochemical characterization of Roman slag from the archaeological site near Mosnje (Slovenia)*. *Materials and technology*, 49. (2015) 343–348.
<http://mit.imt.si/Revija/izvodi/mit153/kramar.pdf>
- [7] Mihailova I., Mehandjiev D.: *Characterization of fayalite from copper slags*. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy* 45. (2010) 317–326.
http://dl.uctm.edu/journal/node/j2010-3/12_Irena_Mihailova_317-326.pdf
- [8] Sowmya T., Sankaranarayanan S. R.: *Spectroscopic analysis of slags – preliminary observations*. In: *VII. International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, South Africa, 2004*. 693–697.
<http://www.saimm.co.za/Conferences/MoltenSlags2004/693-Sowmya.pdf>
- [9] Olovčić A., Memić M., Žero S., Huremović J., Kahrović E.: *Chemical Analysis of Iron Slags and Metallic Artefacts from Early Iron Age*. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 4. (2014) 859–870.
<https://doi.org/10.9734/IRJPAC/2014/12248>
- [10] Sheikh M. R. et al.: *Characterization of iron slag of Kakching, Manipur by X-ray and optical spectroscopy*. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 48. (2010) 632–634.
<http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/10153/1/IJPAP%2048%289%29%20632-634.pdf>
- [11] Chuenpee T., Won-In K., Natapintu S., Takashima I.: *Archaeometallurgical Studies of Ancient Iron Smelting Slags from Ban Khao Din Tai Archaeological Site, Northeastern Thailand*. *Journal of Applied Sciences*, 14. (2014) 938–943.
<https://doi.org/10.3923/jas.2014.938.943>
- [12] Scott R. B., Eekelers K., Degryse P.: *Quantitative chemical analysis of archaeological slag material using handheld X-ray fluorescence spectrometry*. *Applied spectroscopy*, 70. (2016) 94–109.
<https://doi.org/10.1177/0003702815616741>

DSC-mérés során megjelenő újrakristályosodási csúcs vizsgálata

Analysis of Recrystallization Peak Occuring During DSC Measurement

Fejes Gergő Richárd,¹ Gonda Viktor,² Széll Károly³

^{1,2} Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország

¹ fejesgergorichard@gmail.com; ² gonda.viktor@bkgk.uni-obuda.hu

³ Óbudai Egyetem, Alba Regia Műszaki Kar, Székesfehérvár, Magyarország

Összefoglalás

Az intenzív képlékeny alakító eljárásokkal ultrafinom szemcséjű tömbi anyagokat állíthatunk elő. Számos technológia közül a könyöksajtolás az egyik legnépszerűbb módja ezen anyagok létrehozásának. Az ily módon alakított anyagokban tárolt energia nagyban befolyásolja a mikroszerkezetben végbemenő átalakulási folyamatokat: a megújulást és az újrakristályosodást. Szobahőmérsékleten és emelt hőmérsékleten könyöksajtoló réz próbatestek újrakristályosodási folyamatának kinetikáját elemeztük differenciális pásztázó kaloriméter segítségével, majd egy korábbi munka eredményei alapján saját MATLAB-ban írt kiértékelő rutint hoztunk létre a mérési adatok feldolgozásához.

Kulcsszavak: könyöksajtolás, DSC, MATLAB, újrakristályosodás, réz.

Abstract

Severe plastic deformation (SPD) is a well-established methodology for the processing of bulk ultrafine grained materials. Among various methods, equal channel angular pressing (ECAP) is the most popular way of creating ultrafine grained materials. The stored energy after ECAP in these substances highly influences the microstructural processes: recovery and recrystallization of the processed materials. We analyzed the recrystallization kinetics of room and elevated temperature ECAP processed copper samples using differential scanning calorimetry (DSC). For the processing of the measurement data we developed a MATLAB processing routine.

Keywords: ECAP, DSC, MATLAB, recrystallization, copper.

1. Bevezetés

A könyöksajtolás olyan intenzív képlékeny-alakító eljárás, amelynek segítségével szemcsefinomodást érhetünk el hidegalakítás során, és ultrafinom szemcséjű tömbi anyagokat tudunk vele előállítani. A könyöksajtolás során végbemenő nagymértékű képlékeny alakváltozás eredményeképp szövetszerkezetbeli változások mennek végbe. A szemcsék alakban torzulnak, megnő bennük a diszlokációsűrűség. Ezt követően a diszlokációk feltorlódnak és szemcsefinomodás megy végbe.

Az alakítással bevitt energia egy része a diszlokációk által tárolódik az anyagban és újrakristályosodás során felszabadul, az újrakristályosodási folyamat hajtóerejeként. Ez a tárolt energia nagyban befolyásolja a mikroszerkezetben végbemenő összes átalakulási folyamatot. Esetünkben, egy korábbi tanulmány [1] folytatásaként elektrolit rézből készült próbatesteket szobahőmérsékleten és emelt hőmérsékleten könyöksajtolásnak vetettünk alá, majd az alakított darabok termikus viselkedését vizsgáltuk DSC-méréssel.

Az elemzés során az újrakristályosodás révén megjelenő exotermikus úgynevezett újrakristályosodási csúcsot vizsgáltuk, ugyanis ez kapcsolatba hozható az átalakulás során felszabaduló tárolt energiával. Korábban manuális kiértékelési módszereket ismertettünk az eredmények feldolgozásához. Jelen cikkben bemutatjuk egy MATLAB-ban létrehozott kiértékelő rutin segítségével feldolgozott mérési adatokat emelt hőmérsékleten könyöksajtoló minták újrakristályosodása során.

2. Kísérletek

2.1. Könyöksajtolás (ECAP)

A könyöksajtoláshoz a kereskedelmi forgalomban kapható tisztaságú elektrolyt rezet használtunk fel. A húzott rudaktól 10 mm átmérőjű, 60 mm hosszú próbatesteket forgácsoltunk ki, amiket 1 órán át 450 °C-on lágyítottunk.

Az átsajtolást szobahőmérsékleten, 50, 100, 150 és 200 °C-on végeztük el 8 mm/perc előtolási sebesség mellett egy 110° csatornaszögű matricában. A darabokat egyszeri könyöksajtolásnak vetettük alá, eközben mértük a sajtoláshoz szükséges erőt.

A sűrűlódás csökkentésére Molykote nevű, -30 °C–1100 °C hőmérséklet-tartományban alkalmazható kenőpasztát alkalmaztunk.

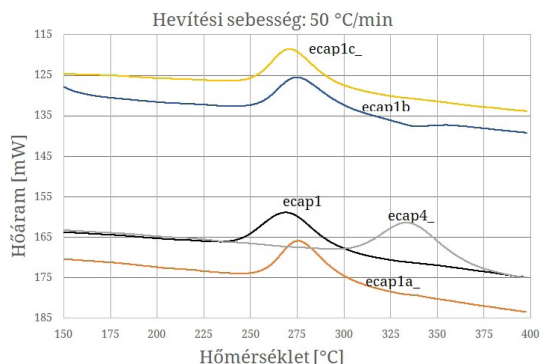
Az alakítási kísérletek után minden alakított darabból legalább négy $\phi 5,9 \times 2,5$ [mm] vagy $\phi 5,9 \times 1$ [mm] méretű, korong alakú próbatest készült a DSC-mérésekhez.

2.2. Termikus vizsgálat (DSC)

A termikus vizsgálatához egy Perkin-Elmer DSC-8000 típusú teljesítménykompenzációs készüléket használtunk. Ezen típusú készülékek jellemzője, hogy a próbatest lineáris hevítéséhez szükséges teljesítményt egy termikusan semleges etalonéhoz képest méri. A mérési eredmény nem más, mint a próbatest és az etalon fűtéséhez szükséges teljesítménykülönbség, amelyet a hőmérséklet vagy az idő függvényében ábrázolhatunk.

A kísérleteket elvégeztük a szobahőmérsékleten, 50, 100, 150 és 200 °C-on könyöksajtoló mintákból kimunkált próbatestekből. A DSC-mérések során 5, 10, 20 és 50 °C/min hevítési sebességet alkalmaztunk. A mintákat először szobahőmérsékletre 400 °C-ra hevítettük fel, majd később, a korábbi eredményekre alapozva csak 350 °C-ig végeztünk méréseket. A rögzítéshez használt Pyris nevű programmal minden egyes méréshez kb. tízezer mérési pontot vettünk fel. Az eredmények

az **1. ábrán** láthatóhoz hasonlóak lettek. Megfigyelhető, hogy a hőáram tengelye fentről lefelé mutat emelkedő értéket.



1. ábra. DSC-készülék által rögzített adatsorok fordított függőleges tengellyel ábrázolva

3. Mérési adatok feldolgozása

Az adatsorok viszonylag nagy mennyisége miatt felmerült az igény a feldolgozás egyszerűbbé tételére. Az általunk készített program minimális felhasználói közbeavatkozással gyors, megbízható eredményeket szolgáltat. Korábban elvégeztük az eredmények feldolgozását a DSC-berendezéshez használatos Pyris szoftverrel, majd Origin és Excel segítségével. Ezen módszerek eredményeivel összehasonlítottuk a saját MATLAB rutin eredményeit.

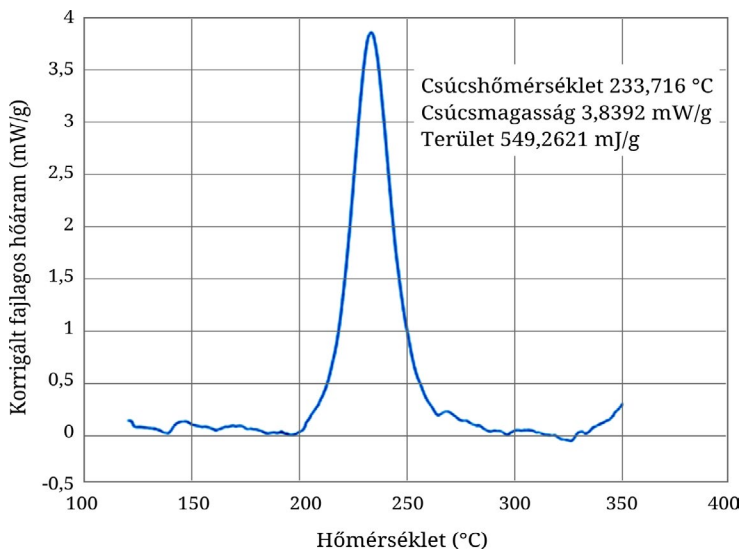
A program egy vezérlőfájlból betölti a mérések után exportált adatsorok neveit, a próbatest tömegét (grammban) és a DSC-mérés során alkalmazott hevítési sebességet. Ezt betölti egy adattáblába, majd onnan történik meg az egyes adatsorokra történő hivatkozás. A feldolgozás során a program kéri a felhasználót, hogy grafikus jelölje ki az adatsoron az exotermikus csúcs kezdeti és végpontját, erre egy harmadfokú polinomot illeszt, amelynek helyességét is grafikus ellenőrizhetjük, majd elvégzi az eredmények kiszámítását. Az elemzés lefutása után a számszerű eredményeket egy ASCII textfájlba menti tabulátorral elválasztva, három tizedesjegy pontossággal. Ezen textfájl tartalmazza a következőket: tömeg, hevítési sebesség, csúcshőmérséklet, fajlagos tárolt energia, csúcsmagasság. Miután az eredményeket tároltuk, lefut egy ábrákat készítő alprogram, amely a fajlagosított értékekkel ábrázolt csúcsot a hőmérséklet függvényében egy diagramban kirajzolja, szöveggként elhelyezi rajta a legfontosabb eredményeket (csúcshőmérsék-

let, csúcsmagasság, csúcs alatti terület), és ezeket egyenként egy képfájlba menti (2. ábra). Mivel könnyöksajtolt próbatestenként négy DSC-mérést végeztünk, minden negyedik feldolgozás után készül egy összegző ábra is, amelyen láthatjuk a hevítési sebesség okozta különbségeket, ami az aktivációs energia meghatározásához szükségeseteketik.

Ezen kívül a program készít egy képet az egyes illesztett polinomokról, valamint az átalakulás ki-

netikájáról a hőmérséklet függvényében. A program működésének részletes leírása és forráskódja az erről készített TDK-dolgozatomban [2] olvasható.

Az aktivációs energiát a Kissinger-elmélet alapján határoztuk meg, melynek során egy transzformált koordináta-rendszer segítségével számítható az újrakristályosodást megindító aktivációs energia [3].



2. ábra. A kiértékelő rutin által készített képfájl

4. Eredmények

Az egyes sajtolási esetek DSC-méréseinek kiértékelése során kapott eredmények az anyag termikus viselkedését segítenek megérteni.

A különböző hevítési sebességekkel felvett adatok közül az 5 °C/min hevítési sebességhez tartozó adatokat mutatjuk be. A csúcshőmérsékletek alakulását a sajtolási hőmérséklet függvényében

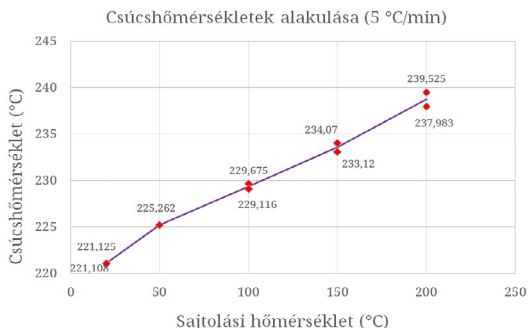
a 3. ábrán tanulmányozhatjuk. Az ábrából egyértelműen látszik, hogy a vizsgált tartományon belül az újrakristályosodási folyamatot jelző exotermikus csúchoz tartozó hőmérséklet a vizsgált tartományon belül egyenletesen növekszik.

Ez alapján arra következtethetünk, hogy a sajtolás hőmérsékletének növelésével megnöveljük az újrakristályosodási folyamat megindításához szükséges energiabefektetést a különböző állapotú darabokban.

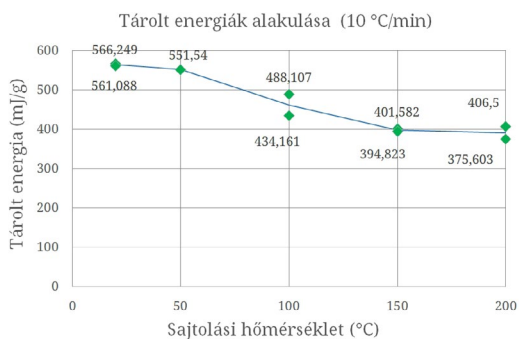
Az újrakristályosodás során felszabaduló tárolt energiák alakulását a 4. ábrán figyelhetjük meg. Ezek csökkenése azt mutatja, hogy az emelt hőmérsékletű könnyöksajtolás során a hőmérséklet növelésével csökken a tárolt energia mennyisége.

Egy adott állapotú darabból kivett mintákon a hevítési sebesség hatása jól vizsgálható az Arrhenius-diagramon, melynek segítségével meghatároztuk az aktivációs energiát. Ezek alakulása az 5. ábrán követhető.

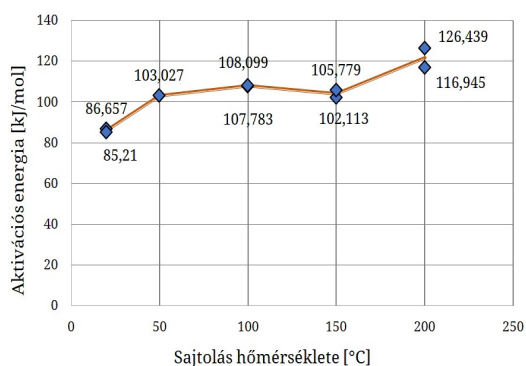
Az aktivációs energiákat vizsgálva megállapíthatjuk, hogy szobahőmérsékleten végzett sajtolásnál adódik a legalacsonyabb érték (kb. 86 kJ/mol).



3. ábra. Az újrakristályosodási csúcshőmérsékletek alakulása a sajtolási hőmérséklet függvényében



4. ábra. Tárolt energiák alakulása a sajtolási hőmérséklet függvényében



5. ábra. Aktivációs energiák alakulása a sajtolási hőmérséklet függvényében

Erre az esetre mondhatjuk, hogy itt a legnagyobb a rendszerben tárolt energia. A csúcshőmérséletek növekedése és a tárolt energiák csökkenése alapján felállított elvárásainknak eleget téve a sajtolási hőmérséklet emelésével növekszik az aktiválási energia.

Ezen eredmények alapján elmondható, hogy a sajtolási hőmérséklet emelésének következtében már a könnyősajtolás alatt is végbemegy bizonyos mértékű átalakulás, hiszen késik az újrakristályosodási folyamat megindulása, csökken a felszabaduló energia mennyisége, az újrakristályosodás megindításához szükséges energia mennyisége pedig növekszik.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás az EFOP-3.6.1-16-2016-00010 pályázat támogatásával valósult meg.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Fejes G. R., Gonda V.: *Könnyősajtoló réz próbatetek DSC vizsgálata*. In: A XXII. Fialat műszakiak tudományos ülészaka előadásai. Proceedings of the 22th international scientific conference of youngth engineers, Kolozsvár-Cluj, Romania, Műszaki Tudományos Közlemények 7. 2017. 151–154.
<https://eda.eme.ro/handle/10598/29768>
- [2] Fejes G. R.: *Könnyősajtoló réz próbatetek DSC vizsgálata*. In: XLV. Tudományos Diákköri Konferencia, Óbudai Egyetem, Budapest, 2017.
- [3] Benchabane G., Boumerzoug Z., Thibon I., Gloriant T.: *Recrystallization of pure copper investigated by calorimetry and microhardness*. Materials Characterization, 59/10. (2008) 1425–1428.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.01.002>

Termográfiai vizsgálat alkalmazása a villamosiparban

Thermographic Inspection in the Electric Industry

Haraszti Ferenc

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Gépészeti és Biztonságtudományi Intézet, Budapest, Magyarország, haraszti.ferenc@bgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás

A műszaki élet számos területén kapcsolnak össze különböző potenciálú fémeket. A potenciálkülönbség miatt hőfejlődéssel járó galvánkorrozíó indulhat el. A villamosiparban használt kötőelemek hagyományos vizsgálata biztonságtechnikai, üzemeltetési szempontból nehézkes, veszélyes folyamat. A termográfia elterjedésével azonban ezek a vizsgálatok a villamos kötések körében egyszerűbben, gyorsabban, biztonságosabban kivitelezhetők. Cikkemben bemutatom a termográfianálízis lehetőségeit, mérési nehézségeit, illetve előnyeit [1–2].

Kulcsszavak: *termográfia, hőkamera, villamosipar.*

Abstract

The traditional inspection of fittings used in the electrical industry is a cumbersome, dangerous process in terms of safety and operation. However, with the spread of thermography, these tests can be performed simpler, faster, and more safely through electrical connections. This article presents the possibilities, measurement difficulties and the advantages of thermography analysis [1–2].

Keywords: *thermography, thermographic camera, electrical industry.*

1. Bevezető

A villamosipar áramátviteli módjai között nagy számban található különböző villamos kötőelemek. Ezek, anyagukat tekintve, legtöbbször réz, acél, alumínium és ezek ötvözetéből állnak. Az eltérő anyagok potenciálkülönbsége miatt galvánkorrozíó léphet fel [3–8]. Ez a kötőelem tönkremeneteléhez vezethet. A jelenség a megnövekedett átmeneti ellenállás miatt hőfejlődéssel jár, ezt mutatja be az 1. ábra és a 2. ábra is. Ennek detektálására néhány éve hőkamerás mérési eljárást használunk. Előnyei közé tartozik a biztonságos és üzemszünet nélküli mérési mód. Korábban megvizsgáltuk a hőfejlődés és az áramerősség kapcsolatát. Méréseink nem lehettek maximálisan precízek, hiszen a fémek a hő hatására megváltoztatják villamos ellenállásukat, ami megint csak hőfejlődéssel járhat, annak mértéke szerint.

E tanulmányban a villamosipar legjellemzőbb kötési módját vizsgáljuk, illetve a réz-acél párosítás ellenállás-változását a hőmérséklet függvényében.



1. ábra. Kontaktkorrozíó okozta károsodás villamos csatlakozónál



2. ábra. Kontaktkorrózió okozta károsodás villamoskötésnél

1.1. Az ellenállás hőmérsékletfüggése

Ha egy fémeket erős melegítés hatásának teszünk ki, tapasztalatunk szerint nő annak ellenállása. Megállapíthatjuk, hogy az ellenállás általában függ a hőmérséklettől. Fémeknél a hőmérséklettel arányosan nő, félvezetőknél, szénél, elektrolitoknál pedig arányosan csökken [9, 10]. Nem extrém nagy hőmérsékleteken és viszonylag kis intervallumban vizsgálódva a kérdéses fémek ρ fajlagos ellenállása minden esetben arányos a vizsgált hőmérséklet-tartományban (1) [11].

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \alpha (t - t_0) \quad (1)$$

ahol:

ρ = fajlagos ellenállás [Ωm],

α = hőfoktényező [1/C°],

t = hőmérséklet [C°].

A fajlagos ellenállás helyett használhatjuk a vele ekvivalens villamos ellenállás fogalmát is, ekkor összefüggésünk a következőképpen alakul (2):

$$R = R_{20} (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta t) \quad (2)$$

ahol:

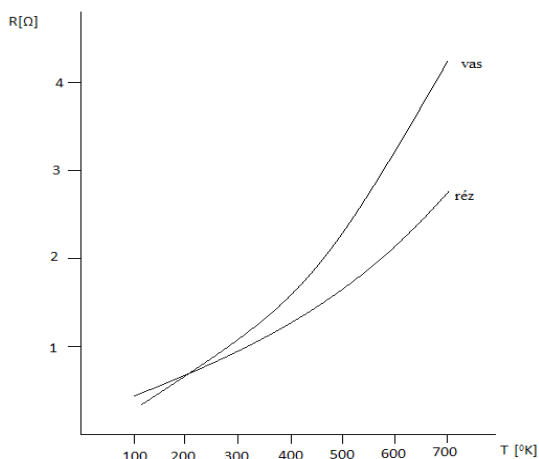
R = villamos ellenállás [Ω],

R_{20} = 20 C°-on vett ellenállás [Ω],

α_{20} = 20 C°-on vett hőfoktényező [1/C°].

Az iparban használt réz és acél kötőelemek ellenállása a hőmérséklet függvényében tehát az alábbi grafikon szerint alakul (3. ábra).

Esetünkben a vizsgált hőmérséklet-tartomány (0–700 °C) kibővítése nem szükséges, hiszen a rendellenesen működő villamos kötőelem káros felmelegedése ebbe az intervallumba tehető.



3. ábra. Ellenállás a hőmérséklet függvényében

1.2. Érintésmentes hőmérsékletmérés

A hőmérséklet mérése infravörös fény alkalmazásával vagy hőkamerás módszerrel függ a testek hőkibocsátó képességétől. A hősugárzás olyan folyamat, mely során a hőáramlás miatt elektromágneses sugárzás jön létre. Az energia nagy részét a test kisugározza vagy egy másik test egy részét visszaveri, a többit átengedi. Ha a vizsgált testre érkező sugárzás teljesen elnyelődik, akkor egy abszolút fekete testről van szó. A fizika törvényeit a gyakorlatban is használjuk. A vizsgált test felülete által kibocsátott elektromágneses spektrum infravörös tartományát elektromos jelekké alakítjuk, így mérjük a hőmérsékletet a hőkamerával [6, 7]. A mérés pontosságát a mérőeszköz, valamint a mérendő tárgy felülete és anyaga is befolyásolja. Az általunk érzékelhető fény hullámhossza 0,4 és 0,75 μm között változik. Az infravörös tartomány ettől eltérő lehet, 0,75–20 μm között. A gyakorlatban ebben a tartományban tudunk méréseket végezni.

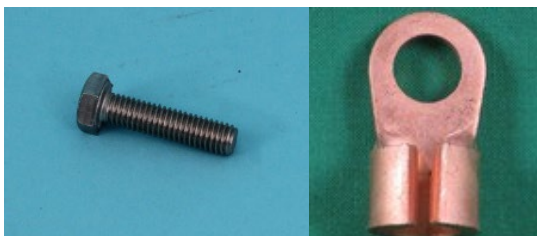
2. Villamos kötőelem vizsgálata

Célunk egy acél-réz pár ellenállásának meghatározása a hőmérséklet függvényében. Mennyivel járul hozzá egy kontaktkorrózióval terhelt, nagy átmeneti ellenállással rendelkező acél-réz kapcsolat villamos ellenállásához? Milyen nagyságrendű ellenállást képvisel az iparban használt általános villamos kontaktus, ha csak a melegedés által vizsgált paramétereket mérjük?

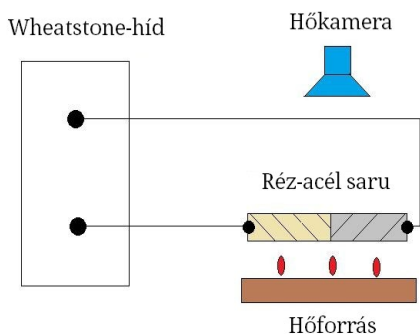
Az irodalmi értékek szerint a fajlagos ellenállás (ill. R ellenállás) nem számottevő, ha a hőmérséklet szemszögéből nézzük. Mégis fontos tudni,

hogyan alakulnak értékei, ha nem laboratóriumi körülmények között vizsgáljuk. Esetünkben egy mindennapos rézsaru és egy acélcsvart a vizsgálat tárgya (4. ábra).

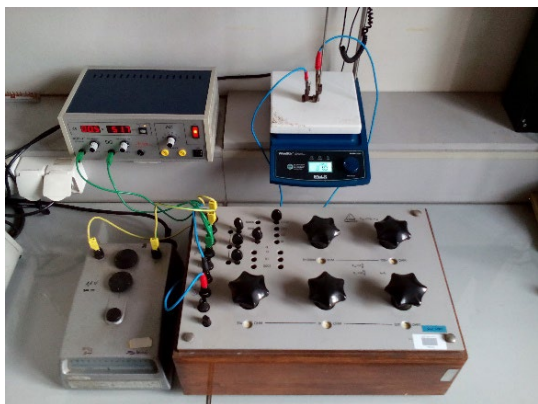
A mérést összeszerelt állapotban végezzük, megfelelő nyomatékkal meghúzva a csavart. Az ellenállásérték nagyságrendje és pontos mérhetősége miatt Wheatston-hidas mérési eljárással dolgozunk [12]. Az alkalmazott hőkamera biztosítja az érintés nélküli hőfokleolvasást üzemszünet nélkül. A villamos kötőelem megfelelő hőkapacitását gázlángos berendezés teszi lehetővé. A mérés elvi vázlatát az 5. ábrán láthatjuk.



4. ábra. Kötőelemek



5. ábra. Mérés elvi vázlata



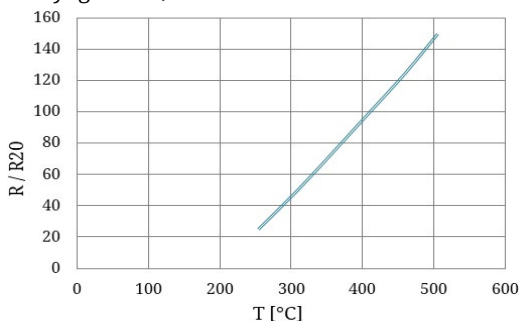
6. ábra. Mérés elrendezése

2.1 Mérési eredmények

A kísérlet során öt mérési sorozatot készítünk, és hibaszámítás után az alábbi eredményeket kaptuk (1. táblázat).

A kapott értékeket a 20 °C-on mért villamos ellenállással (R_{20}) arányosan ábrázolva az alábbi grafikont kapjuk (7. ábra).

Ezt értékelve megállapíthatjuk: a függvény menete hasonló a nagy pontosságú, akkreditált laboratóriumi körülmények közt mért fémtiszta vezető anyagokéval, linearitást mutat.



7. ábra. Ellenállás-arány hőmérsékletfüggése

1. táblázat. Mérési adatok

Sorszám	Hőmérséklet C°	Ellenállás Ω
1.	254	0,1
2.	309	0,2
3.	360	0,3
4.	410	0,4
5.	460	0,5
6.	505	0,6

3. Következtetések

A fentiekben az volt a célunk, hogy megvizsgáljuk a villamosipar által használt kötő, áramvezető alkatrészek ellenállását a hőmérséklet függvényében, továbbá azt, hogy eltér-e, és ha igen, mennyivel az irodalomból megismert értékektől. A mérések nehézségét, a kiértékelés pontosságát a gyártásból adódó különbségek adták, lévén hogy a vizsgálat tárgya egy összeszerelt, esetenként több tagból álló szerelvény volt. Ha összehasonlítjuk az irodalomban fellelhető, minden anyagra megadott hőfoktényezőket az általunk használt réz-acél alkatrészével, a következőket fedezhetjük fel:

A réz és az acél hőfoktényezője $\alpha_{20} = 3,92 \cdot 10^{-3} - 4,2 \cdot 10^{-3}$ értékek között változik. Mérésünk során

már 250 °C-tól 500 °C-ig többszörös vagy akár egy nagyságrendi növekedést mutathatunk ki ($30 - 40 \cdot 10^{-3}$). Ezek a hőmérsékleteken tehát az egy Ohm ellenállású anyag egy darabja ennyivel változtatja meg az értékét 1 °C hatására. A fent említett kontaktkorrózió-hatásnak kitett villamos kötőelemek ellenállása tehát nem csak az átmeneti ellenállás-növekedés miatt növekszik. Számolnunk kell az anyag ellenállásának ilyen módon történő emelkedésével is, főként ha pontosan tartanunk kell egy alkatrész hőmérsékleti jellemzőit, hiszen méréseim szerint áramerősség-függően többször 10 °C különbség is adódhat. Az ellenállást befolyásoló egyéb tényezőkhöz tartozhat még a villamos alkatrészek mechanikai (nyomás és nyújtás) igénybevétele.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Haraszti F.: *The bases of corrosion's investigation*. In: A XXI. Fiatal műszakiak tudományos ülészaka előadásai. Proceedings of the 21th international scientific conference of young engineers, Kolozsvár/Cluj, Romania, Műszaki Tudományos Közlemények 5. (2016) 185–188.
<https://eda.eme.ro/handle/10598/29058>
- [2] Haraszti F.: *Corrosion investigation of steel samples*. In: A XXI. Fiatal műszakiak tudományos ülészaka előadásai. Proceedings of the 21th international scientific conference of young engineers, Kolozsvár/Cluj, Románia, Műszaki Tudományos Közlemények 5. (2016) 189–192.
<https://eda.eme.ro/handle/10598/29057>
- [3] Kovács-C. T., Völgyi B., Sikari-Nágl I.: *Galvanic corrosion behaviour testing in case of aluminium and steel couple*. In: Fiatal műszakiak tudományos ülészaka XVIII., Kolozsvár/Cluj, Románia, Műszaki Tudományos Füzetek 2013. 201–204.
<https://eda.eme.ro/handle/10598/26880>
- [4] Kovács-C. T., Völgyi B., Sikari-Nágl I.: *Investigation of aluminium-steel joint formed by explosion welding*. Journal of Physics – Conference Series 602. (2015) 1–4.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/602/1/012026>
- [5] Wu Y., Barton S. C., Lee A.: *Galvanic corrosion behavior at the Cu-Al ball bond interface: Influence of Pd addition and chloride concentration*. Microelectronics Reliability 92, (2019) 79–86.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.11.016>
- [6] Hack H. P.: *Galvanic Corrosion*. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2016.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.01594-0>
- [7] Hakansson E., Hoffman J., Predecki P., Kumosa M.: *The role of corrosion product deposition in galvanic corrosion of aluminum/carbon systems*. Corrosion Science, 114. (2017) 10–16.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.10.011>
- [8] Khadom A. A., Abod B. M.: *Mathematical model for galvanic corrosion of steel-copper couple in petroleum waste in presence of friendly corrosion inhibitor*. Journal of Applied Research and Technology, 15. (2017) 14–20.
<https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.10.004>
- [9] Wellons M.: *The Stefan-Boltzmann Law*. Physics Department, College of Wooster, Wooster, Ohio 44691, USA, May 9, 2007.
http://g.wooster.edu/jrIS/Files/Wellons_Web_Article.pdf
- [10] Dománková M., Kocsisová E., Slatkovský I., Pinke P.: *The Microstructure Evolution and Its Effect on Corrosion Properties of 18Cr-12Ni-2,5Mo Steel Annealed at 500-900°C*. Acta Polytechnica Hungarica, 11/3. (2014) 125–137.
<https://www.doi.org/10.12700/APH.11.03.2014.03.8>
- [11] Kittel C., Kroemer H.: *Thermal Physics ASTM Standard Practice in A 262 for Detecting Susceptibility to Intergranular Corrosion in Austenitic Stainless Steels*. W. H. Freeman and Company, 1980.
- [12] Budó Á.: *Kísérleti Fizika II*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1971.

Additívan gyártott fém alapanyagok és orvostechnikai eszközök korróziójának vizsgálata

Corrosion Examination of Additive Manufactured Metals and Biomedical Equipments

Kemény Dávid Miklós,¹ Károly Dóra²

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

¹ kemeny david@edu.bme.hu

² kdora@eik.bme.hu

Összefoglalás

Egyre nagyobb szerepet kap az additív gyártás (additive manufacturing, AM), amely segítségével személyre szabott, rövid időn belül előállítható termékek valósíthatók meg, akár a megrendelő szeme láttára. A kutatásunk elsősorban a közvetlen lézeres fémszinterezéshez kapcsolódik. Az új technológia elterjedése egyre több szektorban tapasztalható, így az orvostudomány területét is érinti, amelynél nem engedhetünk meg hibás terméket, hiszen emberi élet múlhat rajta. Kutatásunk során korróziós vizsgálatokat végeztünk. Potenciosztát segítségével határoztuk meg a ciklikus voltammétriás görbéket és a korróziósebességeket. Két tipikus, biokompatibilis implantátumanyagot hasonlítottunk össze, egy kobalt-króm ötvözetet (porkohászati úton gyártott) és egy titánötvözetet (3D nyomtatott). Az eredmények segítenek meghatározni az additívan gyártott alapanyagok korróziós tulajdonságait.

Kulcsszavak: *additív gyártás, közvetlen lézeres fémszinterezés, korrózió, ciklikus voltammétria.*

Abstract

Additive manufacturing (AM) is becoming increasingly important, making it possible to produce a product in a short time, to specific individual requirements, and even in the presence of the customer. This research is related to direct metal laser sintering of additive manufacturing. This new technology is increasingly being used in more sectors, for example in medicine, where a damaged product can potentially endanger human life. Corrosion tests were carried out during our research. Cyclic voltammetry curves and corrosion rates were determined with a potentiostat. Two typical biocompatible implant materials were compared, a cobalt chromium alloy (powder metallurgy) and a titanium alloy (3D printed). The results will help in specifying the corrosion properties of additive manufactured materials.

Keywords: *additive manufacturing, direct metal laser sintering, corrosion, cyclic voltammetry.*

1. Bevezetés

Napjainkban egyre nagyobb teret hódít az additív gyártás. Ennek köszönhetően a kellően bonyolult termékek méretpontosan és gyorsan, akár a vevő szeme láttára is elkészíthetők. Ezzel a technológiával olyan háromdimenziós testek kialakítására kerülhet sor, amelyek hagyományos tech-

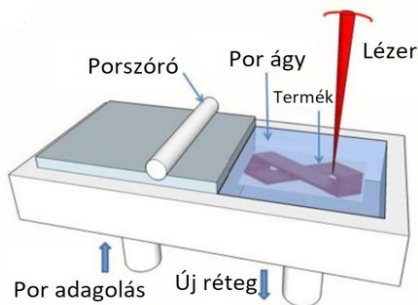
nológiával nem, vagy csak igen nehezen kivitelezhetők. Ezt az eljárást kezdetben polimerekkel használták, de napjainkban már szinte minden alapanyag esetén alkalmazható, amely lehet akár fém, műanyag, kerámia, papír vagy ezek együttese: kompozit [1, 2].

Az additív megmunkálás előtt szükség van egy 3D-s modellre, amelyet egy CAD (Computer Aided

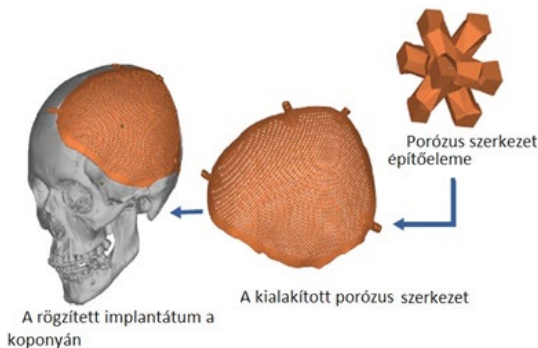
Design) szoftver segítségével készítene el, és szükség esetén a modell bármikor változtatható. Ezt követően a modell STL (Standard Tessellation Language) fájlformátumban szükséges kimenteni, amely így kapcsolatot teremt a 3D-s szoftver és az AM-berendezés között. Az STL fájlformátummal a test felületét háromszögekkel közelítik, s ezek méretei minél kisebbek, annál jobban visszakapjuk a test eredeti geometriáját. Az AM berendezés folyamata során a kívánt terméket rétegről rétegre (layer-by-layer) építik fel a 3D-s CAD-modell alapján [1, 2]. A termék kialakításának folyamata az 1. ábrán látható.

Ennek során a porszóró egy réteg port eloszlat a porágyon, amelyet a nagy teljesítményű lézer a kívánt geometriának megfelelően megolvaszt. Amint elkészült egy réteg, a minta lejjebb kerül, a porszóró újabb réteget alakít ki, melyet a lézer újrapasztáz, és a folyamat kezdődik előlről, mindaddig, amíg a termék el nem készül.

Kutatásunk során a közvetlen lézeres fémszinterezéssel (direct metal laser sintering – DMLS) alakítottuk ki a vizsgálni kívánt próbatestet. Ezt az eljárást több területen is használják, többek között az orvostudomány területén is. Itt alapvető követelmény, hogy az alapanyag biokompatibilis



1. ábra. A termék kialakításának folyamata [3]



2. ábra. Koponyaimplantátum kialakítása [4]

legyen az emberi szervezettel, annak érdekében, hogy ne alakuljon ki szövödmény az implantátum beépítését követően.

Egy ehhez kapcsolódó kutatás során egy koponya hiányzó részének pótlását DMLS-technológiával tudták kivitelezni. Az AM egyik nagy előnye, hogy segítségével egyéni termékeket lehet kialakítani, így a koponya geometriájához illeszkedő, porózus szerkezetű implantátumot tudtak létrehozni, amely a 2. ábrán látható.

2. Vizsgálati anyagok, eljárások

Kutatásunk fő célja, hogy egy hagyományos porkohászati úton gyártott, Eucatech CCFlex típusú 4,0x28 mm Co-Cr koszorúerszent és egy EOSINT M280 (DMLS) géppel gyártott, titán (Ti-6Al-4V) alapanyagú hengeres test korrózióval szembeni ellenállását összehasonlítsuk. Ennek során Biologic SAS SP-150 típusú gép segítségével potenciálkülönbségen alapuló méréseket végeztünk. Próbamérésként először ciklikus voltammetriát határoztunk meg a sztent esetén, majd ezt követően a sztent és titáदारab esetén a Tafel-görbét. A mérések során 0,9 % NaCl fizioológias sóoldatot használtunk. A mérés előtt és után tömegmérést végeztünk APX-200 precíziós mérleggel, továbbá fotókat készítettünk Olympus SZX16 sztereomikroszkóppal és Zeiss MA10 típusú pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM).

3. Az eredmények értékelése

Az 1. táblázatban látható a korrózió hatására bekövetkező tömegcsökkenés, amely a fém oldatba való jutását bizonyítja.

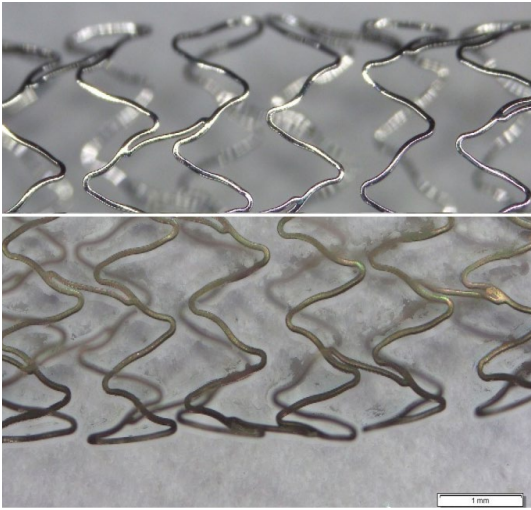
1. táblázat. Tömeg a korróziós teszt előtt és után

	Korróziós teszt előtt	Korróziós teszt után
Co-Cr (L605)	0,0246 g	0,0231 g
Ti-6Al-4V	0,1540 g	0,1539 g

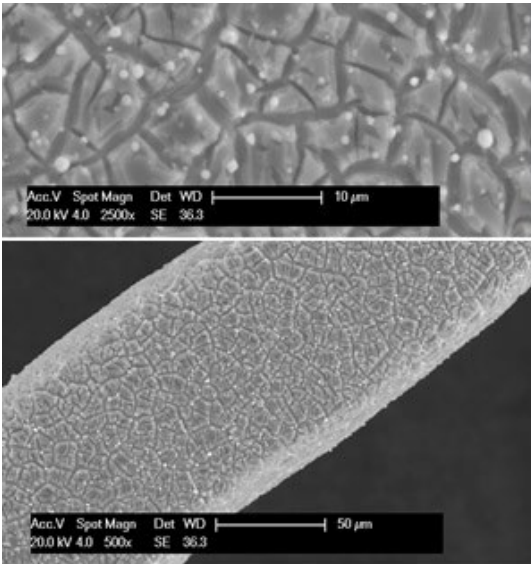
A 3. ábrán levő sztereomikroszkópos felvételen a sztent egy részletének felülete korrózió előtt és után látható. A mérést követően a sztent teljes felületén általános korrózió figyelhető meg.

A 4. ábrán látható a sztent korróziót követő pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvétele. A sztent porkohászati úton készült, így a 4. ábrán látható apró fehér, pontszerű megjelenések vofrárdúsulások.

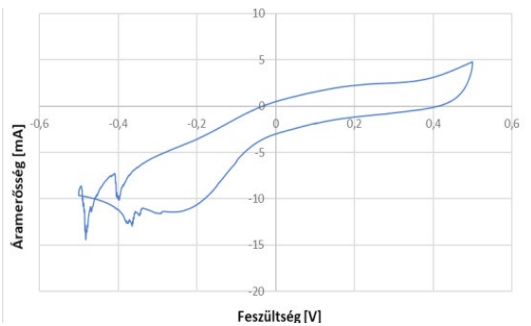
Az 5. ábrán látható a ciklikus voltammetria hiszterézisgörbéje, amelynél meghatározhatunk egy katódos és egy anódos csúcspotenciált:



3. ábra. A sztent felülete a korróziós kísérlet előtt (feül) és után (alul)



4. ábra. A sztent felszínének SEM-felvétele a korróziós tesztet követően

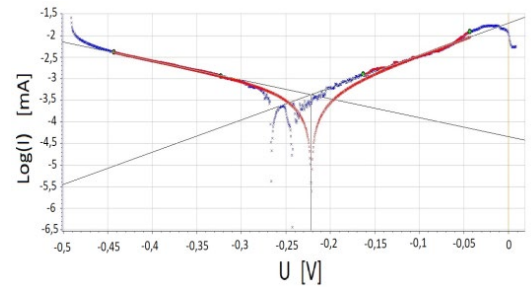


5. ábra. A sztent ciklikus voltammogramja

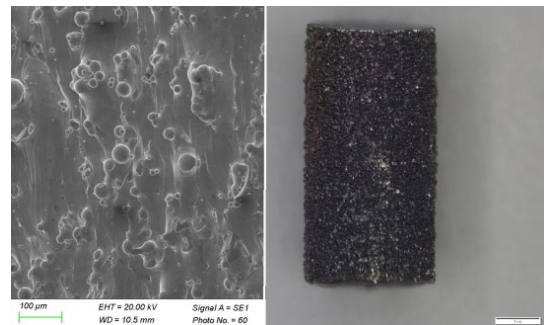
$E_k = -7,25$ mA, $E_a = -12,95$ mA. Ennek során a sztent felületén lévő passzív réteg az oldatba megy, majd ezután egy állandósult helyzet alakul ki.

Ezt követően a sztent Tafel-görbéjét határoztuk meg, amely a 6. ábrán látható. Szoftveres kiértékelés után meghatároztuk a korróziósebességet a sztent összetételének ismeretében, amelynek értéke: $5,72 \cdot 10^{-3}$ mm/év lett.

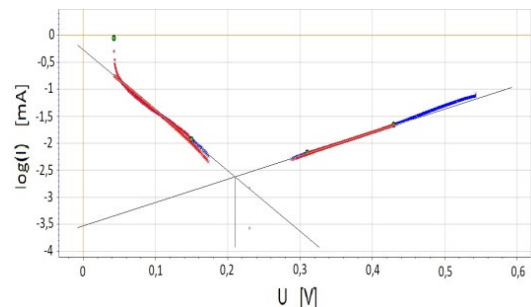
A 7. ábrán az additív minta SEM- és sztereomikroszkópos felvételén is látszik a DMLS-technológia során kialakult egyenetlen felület, amely a por alapanyag megolvadásából, majd véletlenszerű dermedéséből alakult ki. Ez nagyban növeli a hengerpalást felületét, így a pontos felületmért meghatározása nehézkes, valamint a korróziós folyamatokat is befolyásolja.



6. ábra. A sztent Tafel-görbéje



7. ábra. Titánhenger felületének SEM- (balra) sztereomikroszkópos (jobbra) felvétele



8. ábra. Ti-6Al-4V minta Tafel-görbéje

A **8. ábrán** jól látható, hogy a titánminta Tafel-görbéje nagyban eltér a sztent görbéjétől. A korróziósebesség ez esetben $2,27 \cdot 10^{-3}$ mm/év lett.

4. Következtetések

A mérési eredményekből arra következtethetünk, hogy a NaCl 0,9%-os oldat esetén a sztent kevésbé volt ellenálló ugyanolyan korróziós vizsgálati paraméterek mellett, mint a Ti-6Al-4V minta. Ezt alátámasztja, hogy korróziót követően a sztent esetén viszonylag nagymértékű tömegcsökkenést tapasztaltunk, azonban a Ti-6Al-4V minta esetén nem, és a Tafel-görbe alapján meghatározott korróziósebesség 2,5-szer nagyobb volt a sztent esetében.

Vizsgálati módszerünk megfelelő lesz további minták kiértékelésére is. Terveink közt szerepel eredményeink összehasonlítása Co-Cr ötvözetű, additívan gyártott mintákkal és tömbi Ti-mintákkal.

Köszönetnyilvánítás

A projekt a Nemzeti Kutatási és Innovációs Hivatal támogatásával az NKFIH Alapból valósul meg, a

projekt címe: „Egyénre szabott orvosi biológiai implantátumok és segédeszközök új generációs gyártási folyamatának kidolgozása additív technológiákra”; a pályázat azonosító száma: NVKP_16-1- 2016-0022. A szerzők köszönik a támogatást.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: *A polimertechnika alapjai*. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2007.
<https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/polimertechnika-alapjai/index.html>
- [2] Gebhardt A.: *Understanding Additive Manufacturing*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2011.
<https://doi.org/10.3139/9783446431621>
- [3] DebRoy T., Wei H. L., Zuback J. S. et al.: *Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties*. Progress in Materials Science, 92. (2017) 112–224.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- [4] Moiduddin K., Darwish S. et al.: *Structural and mechanical characterization of custom design cranial implant created using additive manufacturing*. Electronic Journal of Biotechnology (2017) 22–31.
<https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2017.06.005>

Gyémánt fúrószegmensek lézeres hegesztésének vizsgálata

Investigation of Laser Welding Technology of Diamond Drilling Segments

Kenéz Attila Zsolt,^{1,2} Bagyinszki Gyula³

¹ Hilti Szerszám Kft., Kecskemét, Magyarország, attila.kenez@hilti.com

² Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest, Magyarország, kenez.attila@phd.uni-obuda.hu

³ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, bagyinszki.gyula@bkgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás

A gyémántszemcséket tartalmazó szegmenseket a költséghatékonyság érdekében cserélhető betétekre vagy acél szerszámtestekre rögzítik. Az alkalmazott kötéstecnológiának meg kell felelnie a környezetvédelmi és a műszaki követelményeknek egyaránt. A kötési zónát használat közben nagy mechanikai és jelentős hőterhelések érik. Hibás kötés esetén a szegmensek leválhatnak az alaptestről és elrepülve sérülést okozhatnak. Napjainkban gyakran alkalmazzák gyémántszegmensek rögzítéséhez a hegesztés vagy a forrasztás különböző eljárásait. A szegmensek rögzítésének lehetséges technológiái közül a lézersugaras hegesztési technológiát elemeztük. A kötések szerkezetét optikai és pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk, majd elemtérképeket készítettünk. A kötések töréskeresztetnek és keménységvizsgálatnak is alávetettük. A különböző technológiákkal készült kötések mechanikai tulajdonságait és összetétel-változásait értékeltük, összehasonlítottuk.

Kulcsszavak: *kötési technológiák, hegesztés, gyémántszegmens, anyagvizsgálat.*

Abstract

Segments containing diamond particles are fixed to replaceable inserts or to steel tool bodies for cost-effectiveness. The joining technology used should meet both environmental and technical requirements. The joining zone is subjected to high mechanical and significant thermal loads during use. In the event of an improper joint, the segments may detach from the base and fly away causing injury. Nowadays, many methods of welding or soldering are used to fix diamond segments. Among the possible segment fixing technologies, laser beam welding has been investigated. The microstructure of the joints has been examined by optical and scanning electron microscopy and chemical element maps have been recorded. Joints have been subjected to fracture and hardness testing. The mechanical properties and composition changes of the joints with different joining technologies have been evaluated and compared.

Keywords: *joining technologies, welding, diamond segment, material testing.*

1. Bevezetés

Az építőipar részéről egyre nagyobb az igény a beton helyszínen történő tervezett vagy rögtönzött megmunkálásához szükséges olyan szerszámokra, melyek jellemző alkalmazási területei: vésés, fúrás, faláttörés, csatornakészítés, felület-

éresítés. Ezeket hatékonyan gyémánttélű szerszámokkal végzik.

A Hilti Szerszám Kft.-nél gyémántszegmenses fúrókoronákat [1] gyártunk az alkalmazások széles köréhez, sokféle alapanyaghoz és különböző teljesítményű szerszámokhoz. A szegmenseket a vé-

kony falú fúrókoronacsőre lézerhegesztéssel rögzítjük. A magfúrók esetén – melyek az Ø8...37 mm átmérőtartományt fedik le – CO₂-lézerforrást, míg fúrókoronák esetén – melyek az Ø40...202 mm átmérőtartományt fedik le – diszklézerforrást használunk a hegesztéshez.

2. Lézersugaras hegesztés

A kis átmérőjű fókuszoltban igen nagy teljesítménysűrűség érhető el, és abszorpció révén az elektromágneses sugárzás hővé alakul a hegesztendő anyagokban. A fellépő hőmérséklet keskeny sávban megolvasztja az összeillesztett munkadarabok határát, és az elhaladó sugárzás mögött keskeny hőhatás-övezetű, csekély torzulást okozó varrat képződik [2].

A gázlézeres hegesztés jellemzően a 10,6 µm-es hullámhosszúságú (távoli infravörös) sugárzást adó CO₂+N₂+He gázkeverékkel történik. Ebben az esetben a CO₂-gáz a lézer „névadója”.

A diszklézeres hegesztés pl. az 1,03 µm-es hullámhosszúságú (közeli infravörös) sugárzást adó Yb:YAG vagy Nd:YVO₄ lézerekkel történhet. A YAG rövidítés az ittrium-alumínium-gránát kristályra mint „névadó” szilárdtestre utal. Ezek a lézerek a CO₂-lézerekhez képest jobb hatásfokkal rendelkeznek.

A lézerhegesztési technológia tervezésekor a hegesztendő anyag jellemzőinek ismeretében kell a lézer típusát, a teljesítménysűrűséget, a hegesztési sebességet és a fókuszpozíciót meghatározni. Az ismert kémiai összetételű anyag felületének megfelelő optikai paraméterekkel (abszorpcióval) és finom érdességgel kell rendelkeznie [3].

A lézertechnológiák – így a hegesztés – a berendezések nagy beruházási költségei ellenére is számos gazdaságossági és műszaki előnyt nyújtanak [4]:

- jelentősen nő a termelékenység;
- csökken az anyag- és a feldolgozási veszteség;
- bonyolult geometria, nehezen hozzáférhető felületek esetén is alkalmazhatók;
- utólagos megmunkálást nem igényelnek;
- automatizált gyártósrba integrálhatók;
- megbízható online minőség-ellenőrzés;
- rugalmasan kihasználható perifériák.

Eltérő minőségű fémek anyagok (ötvözetek) lézeres hegeszthetőségének két alapvető feltétele [5]:

- A két fémek anyag képes legyen egyidejűleg megömleni és közös ömledéket képezni. Ez a feltétel nehezen teljesül, ha a két fém olvadáspontja között nagy a különbség, vagy a hővezető képességük nagyon eltérő. Ezért ha szükséges, a

lézersugarat aszimmetrikusan irányítják a nehezebben megömlő fém felé.

- A két fémek anyag metallurgiaiailag kompatibilis legyen, azaz ne keletkezzenek megengedhetetlen intermetallikus fázisok, átmeneti vegyületformák a hegesztési folyamat során. Ha két ötvözet kötéséről van szó, akkor közelítően sem lehet erre vonatkozóan következtetést levonni az egyensúlyi diagramokból, hanem előzetes kísérleteket kell, ill. célszerű végezni.

3. Vizsgálatok, eredmények

A hegesztett magfúróknak, ill. fúrókoronáknak meg kell felelniük a rájuk vonatkozó műszaki előírásoknak. Első körben a – szériagyártásban alkalmazott – roncsolásmentes és roncsolásos vizsgálatokat végeztük el. Második körben a kötetést és hőhatásövezetét vizsgáltuk.

3.1. Vizsgálati módszerek

A szériagyártásban alkalmazott roncsolásmentes vizsgálatok:

- optikai vizsgálat (szemrevételezés): varratkép ellenőrzése;
- szegmenskiállítás (mérőeszköz: mérőóra): a cső külső átmérőjéhez képest a szegmenseknek nagyobb átmérőn kell elhelyezkedniük, hogy azok dolgozzanak és ne a cső;
- szegmensdőlés (mérőeszköz: mérőóra): a szegmens alsó és felső élein mért különbség a cső külső éléhez képest;
- szegmenselcsavarodás (mérőeszköz: mérőóra): a szegmens elején és végén mért eltérés a cső külső éléhez képest;
- radiális ütés (mérőeszköz: mérőóra): a fúrókoronát körbe forgatva a szegmensek felületén mért radiális eltérés.

A szériagyártásban alkalmazott roncsolásos vizsgálatok:

- törésteszt (mérőeszköz: digitális kijelzésű nyomaték-kulcs): egy készülékben rögzített vizsgálandó termék szegmensére (a formájához illeszkedő) betétet helyezünk, ami nyomaték-kulcshoz csatlakozik. A kulcs nullázása után a szegmenst letörjük, és leolvassuk a kijelzett – törés helyére átszámított – értéket.

A hegesztett kötetést és környezetét az alábbi módszerekkel vizsgáltuk:

- optikai fénymikroszkópos vizsgálat;
- pásztázó elektronmikroszkópos (Scanning Electron Microscope, SEM) vizsgálat;
- energiadiszperzív spektroszkópia (EDS);
- keménységvizsgálat Vickers-eljárással.

3.2. Vizsgálati eredmények

Az elvégzett optikai mikroszkópos vizsgálatok alapján megállapítható:

- a vizsgált minták hegesztési varratának (1. és 2. ábra) geometriája hasonló;
- gázzárványok (3. ábra) előfordulnak hegesztési varratokban.

Az elvégzett SEM-vizsgálatok alapján megállapítható:

- esetenként repedésszerű mintázatok is megfigyelhetők (4. ábra);
- C, Mn, Si tekintetében nem figyelhető meg számottevő különbség az egyes zónák között (5. ábra);
- viszont a neutrális zónából nikkelt ötvöződött be a varratba (6. ábra).

A vonal menti elemzés során az elektronsugárral egy vonal mentén pásztázzuk a mintát (7. ábra).



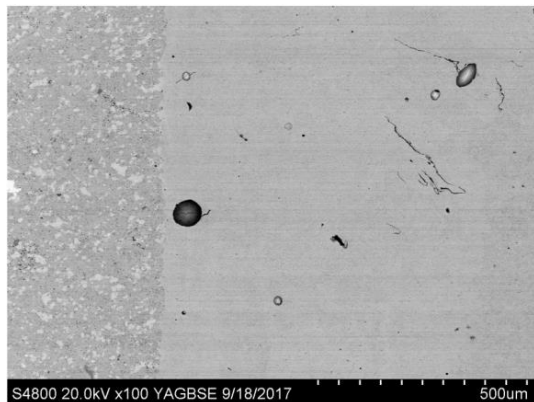
1. ábra. Lézerhegesztett varrat koronaoldali sztereomikroszkópos felvétele



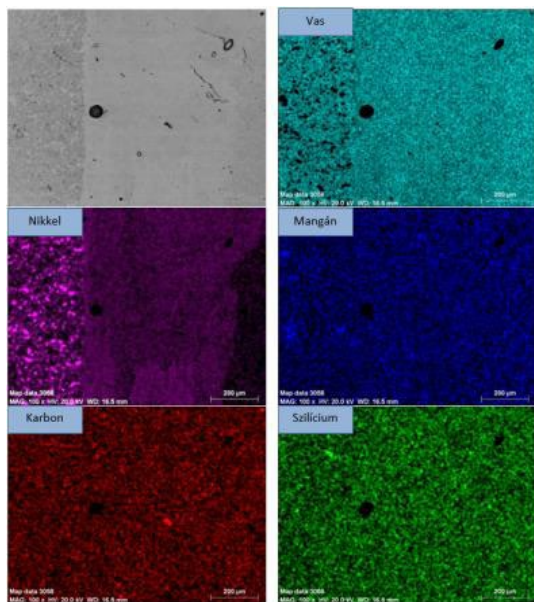
2. ábra. Lézerhegesztett varrat gyökoldali sztereomikroszkópos felvétele



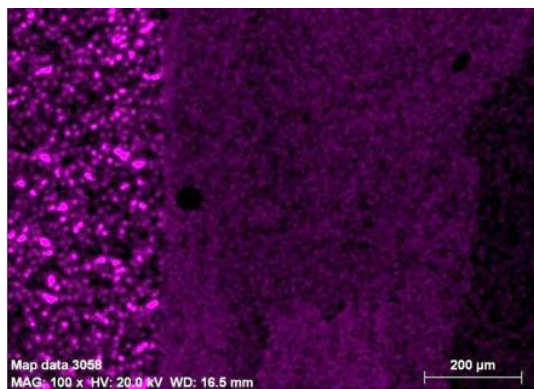
3. ábra. Lézerhegesztett varrat optikai mikroszkópos felvétele



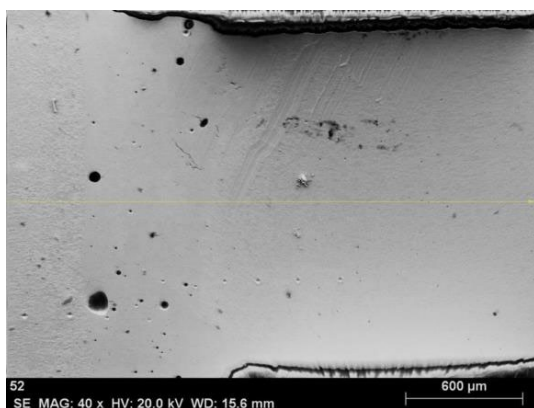
4. ábra. Lézerhegesztett kötés középső zónájáról készült SEM-felvétel



5. ábra. Lézerhegesztett kötés középső zónájáról készült elem térképek



6. ábra. Lézerhegesztett kötés középső zónájáról készült Ni-elemtérkép



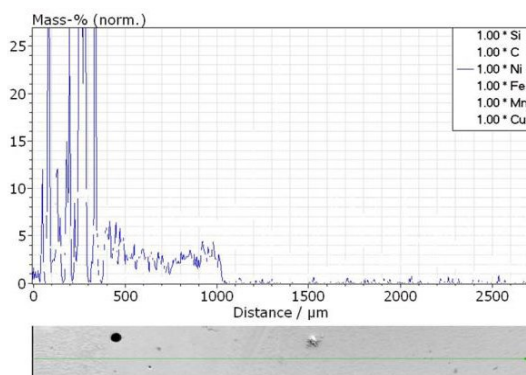
7. ábra. Lézerhegesztett kötés SEM-felvétele, vékony sárga vonal jelzi a vonal menti elemzés helyét (a gyök közelében)

Az energiadisziperzív röntgendetektor (EDX) begyűjti a különböző energiaszintű röntgenfotonokat (ez lesz az EDX-spektrum), és a vonal mentén minden ponthoz hozzárendeli az adott pontban mért EDX-spektrumot.

A nikkell atomkoncentrációja arányos azzal a beütésszámmal, ami az EDX-spektrumon a nikkelatomból kibocsátott energiaszinthez tartozik. Viszont a beütésszám változhat az elektron-sugár áramváltozásától is, ezért kettő vagy több látómező esetében nem összehasonlíthatóak egymással a beütésszámok.

Ezért úgy jártunk el, hogy egy teljes területi elemzéssel meghatároztuk a minta alapanyagát és az ötvözőket. A vonal menti elemzések során mindegyik elem beütésszámát rögzítettük, és 100%-ra normálás után megkaptuk a nikkell (és természetesen a többi elem) valódi tömegszázalékos értékét.

A 8. ábrán csak a nikkell eloszlása látható. A vonalelemzés eleje mindig a porkohászati alap-



8. ábra. Lézerhegesztett kötés nikkellkoncentrációja a varratra merőleges vonal mentén, a varrat közepén

anyagból indul, ahol nikkell szemcsék is találhatóak, így az elemzés elején 100% közelébe ugró csúcsok vannak (a csúcsok teteje nem látható), de a függőleges skála maximumát 25%-ra állítottuk, hogy a varratban lévő alacsony koncentrációjú nikkell is leolvasható legyen a diagramról.

4. Következtetések

A bemutatott felvételek és vizsgálati eredmények egyfajta demonstrációs példáját adják a kutatómunka kiválasztott, ill. alkalmazott módszereinek. A terjedelmi korlátok miatt már nem részletezett keménységmérésekből kitűnik az a nagy energiasűrűségű eljárásokra jellemző kép, miszerint a legnagyobb értékek a varratban (nem a hőhatásövezetben) fordulnak elő.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Vincent C.: *Apparatus and Method for Securing Diamond Segment to Rotating Tool*. US 2005/0279533 A1, 2005.
- [2] Bagyinszki Gy., Bitay E.: *Hegesztéstechnika I. Eljárások és gépezés*. EME, Kolozsvár/Cluj, 2010. <https://eda.eme.ro/handle/10598/15437>
- [3] Kovács T.: *Laser welding process specification based on welding theories*. Procedia Manufacturing, 22. (2018) 147–153.
- [4] Bitay E.: *Lézeres felületkezelés és modellezés*. EME, Kolozsvár/Cluj, 2007. <https://eda.eme.ro/handle/10598/8923>
- [5] Bagyinszki Gy., Bitay E.: *Nagy energiasűrűségű eljárások hegeszthetőségi szempontjai*. In: *Fiatall műszakiak tudományos ülésszaka XVII.*, Kolozsvár/Cluj, Románia, Műszaki Tudományos Füzetek, 2012. 13–18. <https://eda.eme.ro/handle/10598/15489>

A fogászatban használt kobalt-króm alapú vázszerkezetek additív és szubsztraktív együttes gyártása

The Addictive and Subtractive Combined Making of Cobalt-Chrome-Based Frames in Dentistry

Kónya János,¹ Kulcsár Klaudia²

Dent-Art-Technik Kft., Győr, Magyarország

¹ janos@dentarttechnik.hu

² kulcsar.klaudia@dentarttechnik.hu

Összefoglalás

A tanulmányban a fogtechnikai gyakorlatban használt korszerű 3D nyomtatás alkalmazását és a hozzá szükséges előállítási és megmunkálási folyamatot elemezzük. Vizsgáljuk a gyártott fémszerkezetek illeszkedését a használat függvényében, például ragasztott kivitelű konvencionális pótlások, illetve implantátumokra csavarozott rögzített pótlások esetében. Elemezzük a szükséges utómunkálatok hatását és az ezeket befolyásoló tényezőket, például homokszórást, hőkezelést és a forgácsoláshoz szükséges eszközöket, szerszámokat. A vizsgálat célja, hogy megfelelő gyártási folyamatot hozzunk létre az előállított vázszerkezet-típusok szükséges és elégséges illeszkedési pontosságára.

Kulcsszavak: *additív gyártás, 3D nyomtatás, CNC-marás, print and mill, CoCr vázszerkezet.*

Abstract

The following study analyses the use of modern 3D printing technology in dentistry with its necessary manufacturing and machining processes. Fitting of the manufactured metal structures is examined depending on their use, in terms of conventional adhesion-based denture designs and screw-fixed dentures on implants. Influencing factors and effects of the required post-processing steps are examined. Aspects such as sand-blasting, heat treatment, equipment and tools required for cutting are analyzed. The aim of this study is to create a manufacturing process that enables the required precision fitting of the created frame structure types.

Keywords: *additive manufacturing, 3D printing, CNC milling, print and mill, CoCr frame structure.*

1. Bevezetés

A 3D nyomtatás technológiai használatának lehetőségével és az alkalmazás elterjedésével elengedhetetlen vizsgálunk az egyre pontosabb és tökéletesebb fém vázszerkezetek szükséges és elégséges illeszkedését a fogászati gyakorlatban [1, 2]. A tanulmányban vizsgált esetek konkrét munkák elvégzése során kerültek elemzésre, az illeszkedésvizsgálat in vitro modellen a fogtechnikai laborunkban, míg a szájban történt in vivo vizsgálatok rendelői környezetben zajlottak. Kutatásunk célja az volt, hogy megvizsgáljuk az ad-

ditív módon előállított fémszerkezetek nyomtatásból eredő felületeinek sajátosságait. Figyelmet fordítottunk az illeszkedési pontosságot befolyásoló tényezőkre, mint például az alátámasztási elemekre, a különböző helyzetű és irányú felületi érdességekre, valamint eltérésekre [3, 4, 13]. Ezáltal eredményként meghatározhatóvá vált a nyomtatást előkészítő virtuális terv szükséges kompenzációja, az esetleges nyomtatási beállítás, valamint a vázszerkezet funkciójából és rögzítettségéből adódó szubsztraktív utómunkálatok szükségszerűsége [5, 6].

2. A 3D nyomtatás folyamata

2.1. Az alapanyag

Az additív gyártástechnológia során a fogpótlások vázszerkezetei anyagként fogászati Co-Cr ötvözetet használunk [3, 7, 8].

Gyártó: BEGO, típusa: Mediloy S-Co, 5, ISO 22674 és ISO 9693-1.

Összetétel: Co63.9 Cr24.7 W5.4 Mo5.0 Si1.0 [%], szemcseméret: 10-45 μm .

2.2. Sisma MySint 100 és a fémporos nyomtatás folyamata

A vizsgálatunkhoz az LMF (Leaser Metal Fusion) technológián alapuló Sisma MySint 100 típusú fémporos nyomtatót használtuk. Additív módon a fémpor 20 μm -es rétegről rétegre 55 μm -es fókuszpontú, 90 W-os teljesítményű pásztázó lézer segítségével szisztematikus összeolvasztás történik. A nyomtatandó termékek tervezését szabadfelület-modellező programok segítségével valósítjuk meg, az utómunkálat manuálisan, kézi csiszolóeszközök segítségével történik.



1. ábra. A 3D nyomtatási munkaterület

3. A nyomtatott vázszerkezetek illeszkedésének követelményei

Két szignifikáns különbséggel bíró termék előállításáról beszélhetünk. Az első a konvencionális csiszolt csomókra ragasztással rögzített fémszerkezetű fogpótlások. A második az implantátumokat rögzítő pilléreként használt csavaros, oldható kötással létrehozott fémszerkezetű rögzített pótlások. Mindkét esetben azonos előállítási körülmények mellett, azonos nyomtatási hibákkal számolunk, melyek a következők lehetnek: átlagos geometriai hiba, felületi érdességi hiba, alátámasz-

tások okozta pontatlanság és gyártástechnológiai hiba. Gyári adatok és a saját mérési tapasztalatok alapján összegzett értéke 35 μm alatti. [1, 4]

3.1. Ragasztott vázszerkezetek illeszkedését befolyásoló tényezők

A pillérfogak átlagos anatómiai jellemzői a reziliencia, amely a fogágyban történő rugalmas illeszkedést jelenti és 30-50 μm -es elmozdulást tesz lehetővé [10]. A második befolyásoló tényező a pillérfogakon történő rögzítés, mely nagy általánosságban üvegeionomert cementekkel történik, melynek átlagos szemcsemérete 35–40 μm közötti [1]. Ehhez a tervezés során ragasztási hézagot hozunk létre, amely 80–100 μm . A vázszerkezet nyomtatásából adódó pontatlanság átlagos értéke 35 μm alatti. Ebből az következik, hogy a gyártás pontatlansága a fog minimális rezilienciájával, valamint a ragasztással kiküszöbölhető [4]. A vázszerkezet rugalmasságából származó minimális tényezőkkel nincs értelme kalkulálni [5].

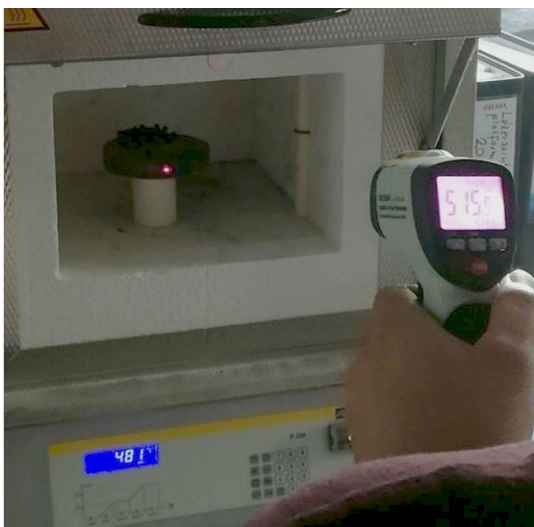
3.2. Csavaros rögzítésű implantátumpillérű vázszerkezetek illeszkedését befolyásoló tényezők

Az implantátumpillérek anatómiai rezilienciája mindössze 7-8 μm , amire még a környező csontszövet nem reagál kompressziós nekrozissal [11]. A második befolyásoló tényező a kétrészes implantátumok illeszkedési felületének illesztése, mely vagy platformon, vagy esetleg kúpon záródik és igényli a pontos pozicionált csatlakozást, mely átlagos értéke 5 μm alatti kellene hogy legyen. A nem kellően zárt implantátumok illeszkedő felületeiben káros baktériumflóra alakulhat ki, mely az implantátum körüli peri-implantitishoz, az implantátum elvesztéséhez vezethet. Ebben az esetben a komplex, több pilléren nyugvó vázszerkezet rugalmassága is szerepet játszik, amely átlagos értéke a perifériákon 10–15 μm [9]. Ennek ellenőrzésére Sheffield-tesztet használunk. A kapott adatok alapján a nyomtatott termékeknel pontosító után marásra van szükség [2, 12].

4. Az additív és szubsztraktív technológia együttes használata

Használati feltételei: a termék tervezésénél egy parametrikus segédprogram használatával az előre kiválasztott után marási felületeket offseteljük, azaz kiegészítjük felületi ráhagyással. A tervezett ráhagyás biztosítja az utánmaráshoz, az eltérések kompenzálásához az anyagszükségletet. A következő lépésben a nyomtatási platform tervezésé-

nél segédelemeket tervezünk a vázszerkezetek modelljéhez a marógépbe történő pozicionálás, nullpont-befogás érdekében. Az így módosított nyomtatási tervet töltjük be a gépbe és nyomtatjuk ki. A felületi érdességet korrigáló homokfúvást követően módosított hőkezelésre kerül sor, amelyet anyagszerkezeti és szilárdságtani vizsgálatokból származó adatok alapján határoztunk meg. A korábbi anyagvizsgálataink mért eredményeit felhasználva megállapítást nyert, hogy a 3D nyomtatással előállított és a gyári programmal hőkezelt fémszerkezet forgácsolással történő megmunkálásának mechanikai tulajdonságai javíthatók. Célja, hogy a feszültségmentesítő hőkezelés során az anyagszerkezet módosult állapota alkalmasabb legyen a pontosító utómunkálatra.



2. ábra. Nabatherm P330 hőkezelő kemencét használat közben

Négy módosított hőkezelési stratégiát határoztunk meg, amelyek során a nyomtatott próbatesten szakító- és keménységvizsgálatokat végeztünk [7]. Az általunk használt CoCr-ötvözethez párosítható metallográfiai és tapasztalati adatokat használtunk fel. Az 1. táblázat valós környezetben mért és használt, a Nabatherm P330 hőkezelő kemencénél alkalmazott adatokat tartalmazza.

1. táblázat. A hőkezelés módosítása

Gyári hőkezelés		Módosított hőkezelés	
Starthőmérséklet	650 °C	Starthőmérséklet	650 °C
Felfűtés: 18 perc	800 °C	Felfűtés: 38 perc	900 °C
Hőntartás: 15perc	800 °C	Hőntartás: 28perc	900 °C
Lehűtés: 60 perc	550 °C	Lehűtés: 75 perc	550 °C

2. táblázat. Az eredmény mechanikai tulajdonságai

	Szakítószilárdság [MPa]	Szakadási nyúlás [%]	Rugalmasági modulus [MPa]
Gyári	923	7,4	39 180
Módosított	1003	16,06	33 804

5. Precíziós utómunkálat

5.1. Eszköze

A Vhf S1 szimultán öttengelyes fogászati marógép vízhűtéses rendszerrel működik, ezáltal képes CoCr és Ti alapanyagok megmunkálására egyaránt. 0,6 kW-os főorsó, kis méret és nagy vizsztatérési pontosság, $\pm 0,003$ mm jellemzi.

5.2. Szerszámai

Az OSG Dental Industry gyémántbevonatú szerszámai nagy pontosságú megmunkálást tesznek lehetővé a fogászati fémtövezetek pontosító utómarása során. A módosított hőkezelésének köszönhetően az általunk használt OSG Dental Industry szerszámok tartósabban és szerszámkímélőbbben tudják a megmunkálási protokollt végzni [1, 5].



3. ábra. Az utómunkálat előtti geometria és felszín



4. ábra. Az implantátumos illeszkedő felület megmunkálva

6. Összefoglalás

A hőkezelés eredményének alkalmazásával, az utánmarás lehetőségének felhasználásával a 3D nyomtatott vázszerkezeteknél a fogtechnikai gyakorlatban használt implantátumokra rögzített fogpótlások a tanulmányunkban meghatározott illeszkedési pontossággal elkészíthetők.



5. ábra. Az illeszkedőfelületük készre munkálásával rendelkező fogmű-vázszerkezetek

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Nelson N., K. S. J., Sunny K.: *Marginal Accuracy and Internal Fit of Dental Copings Fabricated by Modern Additive and Subtractive Digital Technologies*. The European Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry, 25/1. (2017) 20–25. https://doi.org/10.1922/EJPRD_01611Nelson06
- [2] Joda T., Ferrari M., Gallucci G. O., Wittneben J. G., Brägger U.: *Digital technology in fixed implant prosthodontics*. Periodontol 2000, 73/1. (2017) 178–192. <https://doi.org/10.1111/prd.12164>
- [3] Kim K. B., Kim J. H., Kim W. C., Kim J. H.: *Three-dimensional evaluation of gaps associated with fixed dental prostheses fabricated with new technologies*. The Journal of Prosthetic Dentistry, 112/6. (2014) 1432–1436. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2014.07.002>
- [4] van Noort R.: *The future of dental devices is digital*. Dental Materials, 28/1. (2012) 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.10.014>
- [5] Kim D. Y., Kim J. H., Kim H. Y., Kim W. C.: *Comparison and evaluation of marginal and internal gaps in cobalt-chromium alloy copings fabricated using subtractive and additive manufacturing*. Journal of Prosthodontic Research, 62/1. (2018) 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2017.05.008>
- [6] Yan X., Lin H.: *Research progress in CoCr metal-ceramic alloy fabricated by selective laser melting*. Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi, 53/2. (2018) 141–144. <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1002-0098.2018.02.017>
- [7] Barazanchi A., Li K. C., Al-Amleh B., Lyons K., Waddell J. N.: *Additive Technology: Update on Current Materials and Applications in Dentistry*. Journal of Prosthodontics, 26/2. (2017) 156–163. <https://doi.org/10.1111/jopr.12510>
- [8] Kassapidou M., Franke Stenport V., Hjalmarsson L., Johansson C. B.: *Cobalt-chromium alloys in fixed prosthodontics in Sweden*. Acta Biomaterialia Odontologica Scandinavica, 3/1. (2017) 53–62. <https://doi.org/10.1080/23337931.2017.1360776>
- [9] de França D. G., Morais M. H., das Neves F. D., Carreiro A. F., Barbosa G. A.: *Precision Fit of Screw-Retained Implant-Supported Fixed Dental Prostheses Fabricated by CAD/CAM, Copy-Milling, and Conventional Methods*. The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants, 32/3. (2017) 507–513. <https://doi.org/10.11607/jomi.5023>
- [10] Fehér E., Gallatz K., Gerber G., Székely A. D.: *Maxillofacialis anatómia*. Medicina Könyvkiadó Zrt., Budapest, 2014. 79–9.
- [11] Ihde S. K. A., Ihde A. A.: *Bevezetés a Stratégiai Implantátumok használatába*. International Implant Foundation Publishing, München, 2016.
- [12] Marková K., Mitrushchenkov Y., Idhe S. K. A., Idhe A. A.: *Stratégiai implantátumokon végzett technikai munkafázisok*. International Implant Foundation Publishing, München, 2016.
- [13] Redwood B., Schöffner F., Garret B., *The 3D Printing Handbook*. 3D Hubs B.V., Amsterdam, 2017. 123–133, 213–215.

Nagy energiaelnyelő képességű anyagok alkalmazása robbanás elleni védelemre

Testing of High Energy Absorbing Materials for Blast Protection

Kovács Tünde,¹ Nyikes Zoltán,² Lucia Figuli³

¹ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék, Budapest, Magyarország, kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu

² Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola, Budapest, Magyarország, nyikes.zoltan@phd.uni-obuda.hu

³ University of Zilina, Faculty of Security Engineering, Department of Technical Science and Informatics, Zilina, Slovakia, lucia.figuli@fbi.uniza.sk

Összefoglalás

Az épületek védelme századunk egyik igen fontos feladata, mivel egyre fokozódik a terrorfenyegetés. A történelmi, több száz éves épületek robbantással szembeni biztonságának megvalósítása fokozottan fontos feladat, hiszen köréjük a városkép és a városszerkezet miatt kerítést, falat emelni nem lehet. A robbanások jelentős károsodást okozhatnak az épületek falazatában, ezzel együtt a képződő faltörmelék a polgári lakosságot is veszélyezteti, fokozva a robbanás által okozott károsodásokat [1–3]. A robbanás okozta terhelés eltér az anyag kiválasztás és méretezés során eddig alkalmazott terhelésektől. A történelmi épületek esetében is olyan vékony védőréteg alkalmazása szükséges, mely csillapítja a repeszhatást és növeli a falak robbantással szembeni ellenálló képességét. Az anyagtudomány által kifejlesztett új anyagok jó megoldást jelenthetnek ezen feladatok megoldásában. Az új anyagok általában fémhabok vagy társított anyagok, szintaktikus habok, melyek vas vagy kerámia gömbhéjakat avagy szénszálerősítést tartalmaznak [4–6].

Kulcsszavak: *fémhab, energiaelnyelés, épületvédelem, erősített kompozit.*

Abstract

In the current century, building protection is very important in the face of terrorist attacks. The old buildings in Europe are not sufficiently resilient to the loads produced by blasts. We still do not fully understand the effects of different explosives on buildings and human bodies. Computing blast loads are different from that of traditional loads and the material selection rules for this type of impact load are diverse. Historical and old buildings cannot be protected simply by new walls and fences. New ways need to be found to improve a building's resistance to the effects of a blast. It requires sufficiently thin yet strong retrofitted materials in order to reinforce a building's walls.

Keywords: *metal foam, energy absorbing, building protection, reinforced composite.*

1. Bevezetés

Európában számos olyan merénylet történt, amely jelentős károkat okozott. Mind a NATO, mind a visegrádi országok (V4) komoly lépéseket

tesznek a lakosság, a kritikus infrastruktúra és az épületek védelme érdekében [6–8]. Napjaink új kihívása ezáltal az, hogy olyan igénybevételeknek is megfelelő anyagokat fejlesszünk, melyek

re az elmúlt évtizedekben nem volt még szükség. Ilyenek lehetnek például a robbanással szemben védelmet nyújtó anyagok, amelyeknek a lökéshullámok által, valamint a képződő repeszek miatt egy igen összetett és számos paramétertől függő igénybevételnek kell megfelelniük. A robbantás hatására, mely nagy sebességű dinamikus alakításként fogható fel, az anyagok viselkedése eltér a statikus igénybevételek során tapasztalttól.

A hagyományos anyagok statikus igénybevétel hatására történő változásait számos módon lehet ellenőrizni, a belőlük épített szerkezetek méretezése során ezek az ismeretek adnak irányt. A dinamikus és extrém igénybevételekre történő méretezés azonban még sem vizsgálati oldalról, sem az anyagok viselkedését tekintve nincs teljesen kidolgozva.

2. TNT-egyenérték számítása

A robbanás hatására lökéshullámok és hő keletkezik, a robbanóanyag mennyiségétől és minőségétől függ a robbanásból származó energia. A méretezés egyszerűsítéséhez TNT-egyenértéket használunk (1) [3, 8]:

$$W_{TNT} = \left(\frac{\Delta H_{EXP}}{\Delta H_{TNT}} \right) W_{EXP} [kg] \quad (1)$$

ahol:

W_{TNT} (kg) a TNT-töltettel egyenértékű tömeg,
 ΔH_{EXP} (MJ/kg) robbanási hőmennyiség,
 ΔH_{TNT} (MJ/kg) a TNT robbanásából keletkező hő,
 W_{EXP} (kg) a számított robbanóanyag tömege.

Néhány robbanóanyag teljesítményét mutatja az 1. táblázat.

1. táblázat. Robbanási energia néhány gyakori robbanóanyag esetén [8, 9]

Robbanóanyag neve	Robbanási energia [MJ/kg]
TNT	4,1–4,55
C4	5,86
RDX	5,13–6,19
PETN	6,69
Pentolite 50/50	5,86
Nitroglicerín	6,30
Nitrocellulóz	10,60
Amon/Nitrát	1,59

3. Robbanási nyomás meghatározása

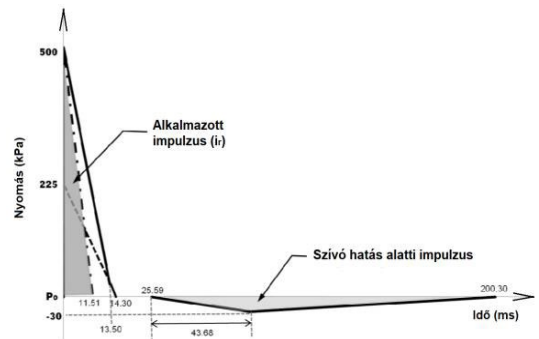
A robbanási terhelés hatásának számítására több elmélet ismert. Ezek közül méretezéshez jól alkalmazható a Hopkinson–Cranz-törvény (2) [8, 9] a robbanás-hatótávolság Z ($mkg^{-(1/3)}$) meghatározására, ahol W (kg) a robbanóanyag tömege TNT-egyenértékre számítva, R (m) a robbanóanyag távolsága az objektumtól.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \left[mkg^{-\left(\frac{1}{3}\right)} \right] \quad (2)$$

A képződő gáz csúcsertékek meghatározására elfogadott a Mills-összefüggés (3), ahol W a robbanóanyag töltettömege TNT-egyenértékben (kg), R a robbanóanyag távolsága az objektumtól (m):

$$P_{so} = \frac{R}{Z^3} - \frac{R}{Z^2} + \frac{R}{Z} [kPa] \quad (3)$$

A robbanás során rövid ideig tartó, nagy energiájú, nyomó igénybevétel jön létre, majd egy hosszabb ideig tartó húzó (szívó) igénybevétel. A nyomásértékekből számítható a méretezési igénybevétel. A robbantási paraméterek, irodalmi adatok [8] felhasználásával a maximális nyomásra az 1. ábrán láthatóak. A nyomó és húzó igénybevételek egy robbanás esetén kerülnek bemutatásra [8].



1. ábra. Falra normál irányú támadási nyomás görbe és a hatáside [8]

4. Klasszikus kompozit tervezési elmélet (CLT)

A kompozitanyag tervezése során jól ismert a klasszikus tervezési elmélet. Erre az elméletre és tervezési szabályokra alapozva új kompozitokat állíthatunk elő statikus és dinamikus terhelésekre, de a robbanási terheléshez nem találhatók még tervezési szabályok. Kutatásunkban a klasszikus tervezési szabályok képezik a robbanásveszélyes anyagok tervezésének alapját. A gyakor-

lati hatásvizsgálat alapján a robbanásveszélyes kompozitok tervezési szabályait megtervezhetjük.

A tervezési lépések a következők [4]:

1. a merevség mátrix (Q) elemeinek minden rétegre történő meghatározása,
2. a terhelések meghatározása,
3. a rétegek sík deformációjának kiszámítása (ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , γ_{xy}),
4. a feszültség meghatározása minden rétegben (σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{xy}),
5. a rétegek elasztikus állandójának kiszámítása (E_{xx} , E_{yy} , ν_{xy} , ν_{yx} , G_{xy}),
6. az átlagos hatáserősség meghatározása a károsodási paraméterek alapján.

A következő speciális anyag esetében alkalmazott ez az elmélet (CLT). A terhelés összetett a nagy nyomás és a nagy energiahatás miatt.

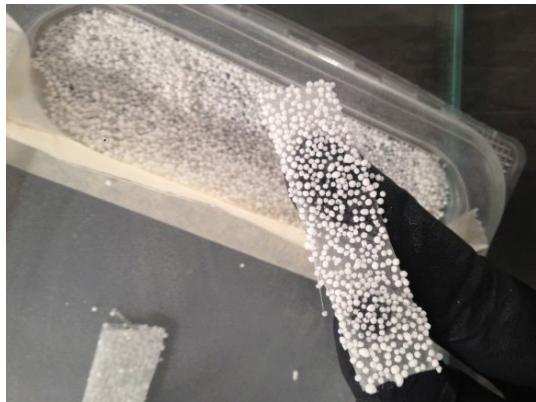
5. Speciális kompozit bemutatása

Az épületek védelme miatt új technológiák alkalmazására van szükség. Az új anyagok fejlesztésére az anyagtudomány jó megoldást adhat. Ezek az anyagok általában kompozitok, úgymint a szintaktikus habok, a gömbhéjakkal vagy szén-szálakkal erősített polimerok [4–6]. Néhány általános technika már bemutatásra került az előző munkákban, melyek az épületvédelem gyakorlati megvalósítására fókuszáltak. Számos ilyen technika került már ismertetésre [12, 14]. Az ismertetett igénybevétel esetén nagy kinetikaenergia-nyelő képességű anyagot kell választani vagy tervezni. A fémhabok és kompozitok alkalmazása megfelelő lehet.

A következő fejlesztésben egy polimer szendvics-szerkezetű kompozitot mutatunk be, kerámia gömbhéjakkal és üvegszövetrel erősítve.

A szendvics-szerkezetű polimer gyártási folyamatának egy lépése a 2. ábrán látható, míg a kész darabot a 3. ábra mutatja be. A darabok dinamikus igénybevétellel szembeni ellenállása Charpy-vizsgálattal történt. A bemutatott kompozit esetén jól látható az alkalmazott rétegrendszer. Az alkalmazott kerámia gömbhéjakat (átlagosan 0,8 mm átmérő) és az üvegszövetet (390 g/m²) epoxi gyantába (Araldite LY 1564) ágyazták, 15 rétegben.

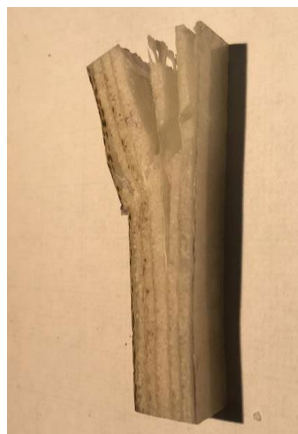
A Charpy ütve hajlító, dinamikus vizsgálat eredménye a 4. ábrán látható, a darab nem tört el és nem szakadt részekre. Természetesen ez a vizsgálat nem helyettesíti a valós igénybevételt, de a dinamikus hatást közelíteni képes erősített polimer vizsgálatok során [10].



2. ábra. Kerámia gömbhéjakkal és üvegvászonnal erősített polimer gyártása [10]



3. ábra. Kerámia gömbhéjakkal és üvegszövetrel erősítve



4. ábra. Charpy-vizsgálat eredménye [11]

6. Összefoglalás

Megfigyelhető volt a különböző méretű gömbhéjak alkalmazása esetén, hogy a nagyon kis méretű kerámia-gömbök nem tudták lényegesen növelni a kompozitanyag energiaelnyelő képességét, míg a nagyméretű gömbök sok esetben nyitottak voltak, így a gyártás során megteltek gyantával,

ami csökkentette az energiaelnyelő képességüket. A bemutatott szendvicskompozit-fejlesztési irány a robbanási terhelésre méretezve, a dinamikus igénybevétellel szemben jó ellenálló képességet és irányadó tapasztalatot szolgáltatott a további tervezéshez. A robbanással szemben ellenálló anyag tervezése során tehát elsődleges szempont a nagy energiaelnyelő képesség, valamint a repeszhatás megakadályozása. További fejlesztési irány, hogy a felhasznált anyagok minél nagyobb hányada újrahasznosítható legyen. Ez a bemutatott szendvicsszerkezetű kompozit esetében igen korlátozottan valósul meg.

Terveink szerint a tapasztalatok felhasználásával új kompozitanyagokat fejlesztünk az ismertett igénybevételnek megfelelően.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak Bezzeg Andrásnak, Végh Ákosnak (KANDSI Kft., AKOBEZ) a kompozit gyártásáért, valamint Balázs Ágostonnak a Charpy-vizsgálatok elvégzéséért.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Lu G., Yu T.: *Energy absorption of structures and materials*. Woodhead Publishing, Cambridge, England, 2003. 317–351.
- [2] Uddin N.: *Blast protection of civil infrastructures and vehicles using composites*. Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [3] Conrath E. J. et al.: *Structural Design for Physical Security State of the Practice*. Structural Engineering Institute, US, Virginia, 1999. Chapter 2. 1–34.
- [4] Ashby M.F. et al.: *Metal Foams: A design Guide*. Butterworth-Heinemann, 2000.
- [5] Vaidya U. K.: *Impact Response of Laminated and Sandwich Composites*. In: *Impact Engineering of Composite Structures*. (Szerk.: Serge Abrate et al.). CISM 526., Springer, Vienna, 2011. 97–191. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0523-8_4
- [6] Kovács T.: *Épületvédelem nagy energia elnyelő képességű anyagokkal*. In: A XXII. Fialat műszakiak tudományos ülészaka előadásai, Kolozsvár/Cluj, Románia, Műszaki Tudományos Közlemények 7., Erdélyi Múzeum-Egyesület, 2017. 247–250. <https://eda.eme.ro/handle/10598/29793>
- [7] Balázs Á., Nyikes Z., Kovács T.: *Building Protection with Composite Materials Application*. Key Engineering Materials, 755. (2017) 286–291. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.755.286>
- [8] Karlos V., Solomos G.: *Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components*. Publication Office of the European Union (2013) 1–49. <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC87200>
- [9] Figuli L., Jangl Š., Papán D.: *Modelling and Testing of Blast Effect On the Structures*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 44. (2016). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/44/5/052051>
- [10] Bezzeg A., Végh Á.: *Kompozit gyártási jegyzőkönyv*. AKOBEZ, Budapest, 2018.
- [11] Balázs Á.: *Épületvédelem kompozit anyagokkal*. MSc diplomaterv, OE-BGK, Budapest, 2018.
- [12] Figuli L., Štaffenová D.: *Practical aspect of methods used for blast protection*. Key Engineering Materials, 755. (2017) 139–146. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.755.139>
- [13] Figuli L., Magura M., Kavický V., Jangl Š.: *Application of recyclable materials for an increase in building safety against the explosion of an improvised explosive device*. Advanced Materials Research, 1001. (2014) 447–452. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1001.447>
- [14] Štoller J., Dvořák P.: *Field Tests of Cementitious Composites Suitable for Protective Structures and Critical Infrastructure*. Key Engineering Materials, 722. (2016) 3–11. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.722.3>

A fogtechnikai gyakorlatban használt 3D nyomtatott kobalt-króm ötvözet hőkezelésének befolyása a mechanikai tulajdonságokra

The Influence of Heat Treatment on the Mechanical Properties of 3D-Printed Cobalt-Chrome Alloy Used in Dental Laboratory Practice

Kulcsár Klaudia,¹ Kónya János²

Dent-Art-Technik Kft., Győr, Magyarország

¹ kulcsar.klaudia@dentarttechnik.hu

² janos@dentarttechnik.hu

Összefoglalás

Az alkalmazott alapanyag a fogászati implantációs protézisek előállításához a kobalt-króm ötvözet. A tanulmányban a fogászati implantációs protézisek új hőkezelési technológiáját mutatjuk be. A mintákat az innovatív 3D nyomtatási technológiával készítettük el. A gyártó által megadott hőkezelési eljárással készített minták ridegsége tette szükségessé, hogy átgondoljuk a hőkezelés menetét. A kiválasztott hőkezelési eljárások változtatását követően szakítópróbákat és keménységméréseket végeztünk, melyek segítségével kiválasztottuk a számunkra megfelelő hőkezelési eljárást.

Kulcsszavak: kobalt-króm ötvözet, hőkezelés, 3D nyomtatás.

Abstract

The material used for manufacturing of dental implantation prostheses is cobalt-chromium alloy. The following study presents a new heat treatment technology for dental implantation prostheses. Specimens were created with the innovative technology of 3D printing. The brittleness of specimens subjected to heat treatment with parameters recommended by the manufacturer made it necessary for us to reconsider the heat-treating process. After changing given heat treatment processes, tensile and hardness tests were performed. From these tests, the optimal heat treatment process technology was chosen.

Keywords: cobalt-chrome alloy, heat treatment, 3D printing.

1. Bevezetés

A kobalt alapú ötvözeteket az elmúlt évtizedekben széles körben használják öntöttformában, kiváló korrózióállóságuk, biokompatibilitásuk és szilárdságuk miatt [1–3]. Az évek során a kobalt-króm (Co-Cr) ötvözetek figyelemre méltó sokoldalúságot és tartósságot mutatnak ortopédiai implantátumként [4]. A Co-Cr ötvözeteket a fogá-

szatban is alkalmazzák, például abutmentek (felépítmények), koronák és hidak esetében [5]. Ezek az ötvözetek legnagyobb egyensúlyt biztosítanak a szilárdság és kopás között, valamint nagy a korrózióval szembeni ellenállásuk [6–10]. A fogászati szakterületen hagyományosan a viaszveszejtési technikát alkalmazzák, mely évtizedek óta használatban van, viszont ez igen hajlamos emberi hibákra [11]. Gyakori a fogászati implantátumok

konvencionális módszerekkel történő előállítás, mint például az öntési technológia [12]. A precíziós öntés és a kovácsolás továbbra is a hagyományos eljárások közé tartozik az implantátumok készítésénél [13], viszont az additív gyártástechnológia egyre elterjedtebbé válik a fogprotézisek gyártásánál [14]. Ahhoz, hogy az SLM gyártástechnológiát az implantátumok vagy protézisek gyártási technikájává alakítsák, bizonyos feltételeknek meg kell felelniük. A lézerrel történő olvasztással létrehozott rétegeknek mechanikai és kémiai tulajdonságokra vonatkozó szigorú követelményeknek kell megfelelniük [15]. Vizsgálták az SLM (Selective Laser Melting) eljárással gyártott ötvözetek mechanikai tulajdonságait és korrózióállóságát [16], valamint a Co-Cr ötvözet és a kerámia közötti kötési szilárdságot [17].

2. Anyagok és módszerek

2.1. Felhasznált anyagok

Fogászati Co-Cr ötvözetet alkalmaztunk, típusa: 5, ISO 22674 és ISO 9693-1. A kobalt-króm anyagösszetételét tömegszázalékban az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat. Co-Cr ötvözet anyagösszetétele

Anyagösszetétel	Tömegszázalék [%]
Kobalt (Co)	63,9
Króm (Cr)	24,7
Volfram (W)	5,4
Molibdén (Mo)	5,0
Szilícium (Si)	1,0

2.2. Minták 3D nyomtatása

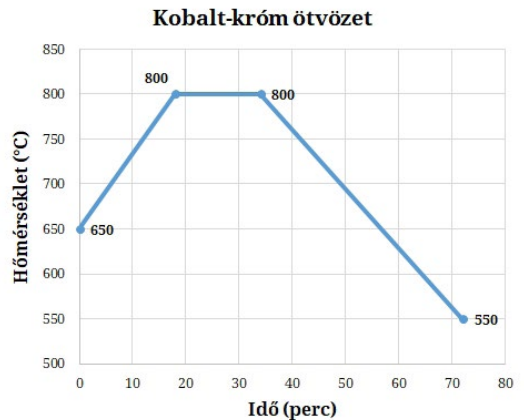
A Co63.9Cr24.7W5.4Mo5.0Si1.0 [%] ötvözet additív gyártástechnológiai eljárással használható fel implantátumok és protézisek készítésére. A próbatesteket a Sisma Mysint 3D nyomtatóval állítottuk elő. A nyomtatás LMF (Laser Metal Fusion) technológiával történik. A technológia egyedi nyomtatási stratégiát von maga után. Hőelvezető alátámasztásokat tartalmaz, melyek mellé utólagos hőkezelés céljából programozható kályhát telepítettünk, és precíziós utómunkálatokra külön szoftver és marógép áll rendelkezésünkre. Az additív gyártástechnológiát digitális modell készítése előzi meg. A 3D nyomtatás olyan additív gyártástechnológia, mely rétegről rétegre hordja fel a fémporréteget, és strukturált összeolvasztással készíti el a mintákat. A próbatest modelljét 3D-s tervezőprogramban készítettük, majd a

3D nyomtatás körülbelül négy órát vett igénybe. A próbatestek a nyomtatást követően az építőlatformmal együtt kikerülnek a gépből, ezt követően szétválasztjuk őket egymástól. A hőelvezető alátámasztásokat, szupportokat, melyek a próbatestet összekötik a koronggal, eltávolítjuk.

2.3. Hőkezelés

A 3D nyomtatást követően a próbatestek hőkezelésre kerülnek, melyet a gyártó határozott meg. A gyártó által megadott hőkezelés diagramja az 1. ábrán látható. A hőkezelés három szakaszból áll: felhevítési, hőntartási és hűtési szakaszból.

A hőkezelendő alkatrész alakjának, méreteinek, anyagminőségének, valamint a hőkezeléssel előállítandó minőségi követelményeknek az ismeretében választható ki a megfelelő hőkezelő eljárás, és határozható meg a legfontosabb technológiai paraméterek, mint például a hevítési hőmérséklet, hűtési mód.



1. ábra. A gyártó által kiadott hőkezelési eljárás

3. Vizsgálatok

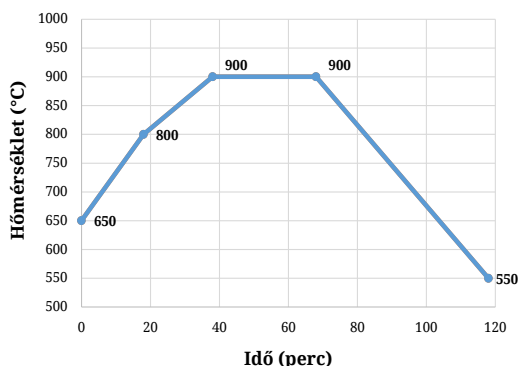
A gyártó által meghatározott hőkezelés során rideg szerkezetet kaptunk, ezért a kinyomtatott minták esetében törés is előfordult. Ezt követően kezdtünk el változtatni a hőkezelési eljárásán. Első körben a hőmérsékletet változtattuk. A 2. táblázatban szereplő sorszámok a következőket jelentik. Az 1-es sorszám a gyártó által megadott hőkezelési menet, melynek maximális hőmérséklete 900 °C. A 2-es és 4-es sorszámmal jelölt hőkezelési menet maximális hőmérséklete 900 °C, a 3-as és 5-ös sorszámnál pedig 1050 °C. A 3-as és 5-ös sorszámnál az időket változtattuk meg, ahol mindhárom szakasz idejét megnöveltük. A változtatások során metallográfiai és tapasztalati adatokat használtunk fel.

2. táblázat. A kísérletek mechanikai tulajdonságai

Sorszám	Szakítószilárdság [Mpa]	Szakadási nyúlás [%]	Rugalmassági modulus [Mpa]
1	923	7,4	39 180
2	1041	7,2	47 362
3	1095	7,5	45 302
4	1003	16,06	33 804
5	1097	12,05	34 742

Az 1-es sorszámú hőkezelési eljárás a gyártó által kiadott hőkezelés. Az eddigi vizsgálatok alapján a 4-es sorszámmal sikerült elérnünk az eddigi legjobb eredményt, mellyel meg tudtuk növelni a szakadási nyúlást, ezáltal degradálódott a rugalmassági modulus, így sikerült csökkenteni a szerkezet ridegségét. A 4-es sorszámú hőkezelés diagramja a **2. ábrán** látható. Az 5-ös sorszámú hőkezelési eljárást 1050 °C-on végeztük el 118 percen keresztül, sok eltérés nem látható, viszont a felületen oxidáció lépett fel.

A mintákon ezt követően keménységméréseket végeztünk, melynek során Rockwell keménységmérési eljárást alkalmaztunk. A mintákon több ponton mértünk, így a **3. táblázat** az átlagértékeket tartalmazza. A táblázatból látható, hogy a 4-es sorszámú mintának a keménysége lett a legnagyobb. A 4-es sorszámú eljárás esetében mu-

Kobalt-Króm ötvözet**2. ábra.** Hőkezelés menete**3. táblázat.** A kísérleteknél mért keménységértékek

Sorszám	Keménység (HRC)
1	37,37
2	42,3
3	40,04
4	44,88
5	44,4

tatták a mért értékek a legkisebb szórást, a többenél nagyobb eltéréseket mértünk. A kialakult keménységértékek szórása további kutatásokat eredményez.

4. Következtetések

A tanulmányban különböző hőkezelési eljárásokat mutattunk be. Az volt a célunk, hogy kobalt-króm ötvözetből, additív gyártástechnológiával készített próbatesteknek a mechanikai tulajdonságai minél jobban megfeleljenek a fogászati előírásoknak. Rugalmassági modulusa degradálódott, ami az anyag merevségéről nyújt információt. Kutatásunk folytatódik, további hőkezeléseket vizsgálunk.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Davis J. R.: *Nickel, cobalt and their alloys*. Materials. Park (OH), ASM International, 2000.
- [2] Nasab M. B., Hassan M. R., Sahari B. B.: *Metallic biomaterials of knee and hip: a review*. Trends in Biomaterials and Artificial Organs, 24/2. (2010) 69–82.
<https://medind.nic.in/taa/t10/i2/taat10i2p69.pdf>
- [3] Malayoglu U., Neville A.: *Mo and W, as alloying elements in Co-based alloy: their effects on erosion-corrosion resistance*. Wear, 259. (2005) 219–229.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.038>
- [4] Monroy K., Delgado J., Ciurana J.: *Study of the pore formation on CoCrMo alloys by selective laser melting manufacturing process*. Procedia Engineering, 63. (2013) 631–369.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.227>
- [5] Wataha J. C., Schmalz G.: *Dental alloys*. In: Biocompatibility of Dental Materials. (Szerk.: Schmalz G., Arenholt-Bindslev D.). Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. 221–254.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-77782-3_8
- [6] Kalpana S. Katti: *Biomaterials in total joint replacement*. Colloid Surface B: Biointerfaces, 39/3. (2004) 133–142.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2003.12.002>
- [7] Hsu H. C., Lian S. S.: *Wear properties of Co-Cr-Mo-N plasma-melted surgical implant alloys*. Journal of Materials Processing Technology, 138. (2003) 231–235.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00077-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00077-3)
- [8] Okazaki Y., Gotoh E.: *Comparison of metal release from various metallic biomaterials in vitro*. Biomaterials, 26/1. (2006) 11–21.
<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.02.005>
- [9] Lin H. Y., Bumgardner J. D.: *In vitro biocorrosion of Co-Cr-Mo implant alloy by macrophage cells*. Journal of Orthopaedic Research, 22/6. (2004) 1231–1236.
<https://doi.org/10.1016/j.orthres.2004.04.005>

- [10] Hsu R. W-W., Yang C.-C., Huang C.-., Chenb Y.-S.: *Electrochemical corrosion studies on Cr-Co-Mo implant alloy in biological solutions*. Materials Chemistry and Physics, 93/2-3. (2005) 531–538. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.04.007>
- [11] Eggbeer D., Ribb R., Williams R.: *The computer-aided design and rapid prototyping fabrication of removable partial denture frameworks*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H: Journal of Engineering in Medicine, 219/3. (2005) 195–202. <https://doi.org/10.1243%2F095441105X9372>
- [12] Dourandish M., Simchi A., Godlinski D.: *Rapid Manufacturing of Co-Cr-Mo Implants by Three-Dimensional Printing Process for Orthopedic Applications*. Iranian Journal of Pharmaceutical Sciences, 4/1 (2008) 31–36. <https://pdfs.semanticscholar.org/9eef/39e-3f5ccb9b96171911b399044c201b66f12.pdf>
- [13] Bertol L. S., Júnior W. K., da Silva F. P., Kopp C. A.: *Medical design: Direct metal laser sintering of Ti-6Al-4V*. Materials & Design, 31/8. (2010) 3983–3988. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.02.050>
- [14] Senthilkumaran K., Pandey P. M., Rao P. V. M.: *Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering*. Materials & Design, 30/8. (2009) 2946–3294. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.009>
- [15] Takaichi A., Nakamoto T., Jokod N., Numorab N., Tsusumib Y., Migita S. et al.: *Microstructures and mechanical properties of Co-29Cr-6Mo alloy fabricated by selective laser melting process for dental applications*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 21 (2013) 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.01.021>
- [16] Nan X., Xian-Zhen X., Jie C., Bin W.: *Metal-ceramic bond strength of Co-Cr alloy, fabricated by selective laser melting*. Journal of Dentistry, 40/6. (2012) 453–457. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2012.02.006>
- [17] Davis J. R. (Ed.): *Cobalt-Base Alloys*. In: Handbook of Materials for Medical Devices. ASM International, Ohio, 2003. 31–37.

Az ellenállás-hegesztés lézersugaras hegesztéssel való kiválthatóságának lehetőségei

The Replacement of Resistance Welding with Laser Beam Welding

Maloveczky Anna,¹ Karai Ambrus²

Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., Budapest, Magyarország

¹ anna.maloveczky@bayzoltan.hu

² ambrus.karai@bayzoltan.hu

Összefoglalás

Az ellenállás-hegesztést régóta sikeresen alkalmazzák az autóiparban, azonban mára már vannak korszerűbb technológiák is, mint például a lézersugaras hegesztés, mely sokkal gyorsabb, gazdaságosabb és rugalmasabb technológia. A munkánk során feltérképeztük az ellenállás-hegesztés lézersugaras hegesztésre történő leválthatóságának lehetőségét, valamint megoldást találtunk a lézersugaras hegesztés esetén fellépő problémák kiküszöbölésére. A legnagyobb kihívás a lézersugaras technológia során az, hogy az acéllemezen lévő cinkbevonat (ez a korrózió megakadályozása érdekében szükséges) a hegesztés során elpárolog, ami pórusokhoz, így jelentős varratszilárdság-csökkenéshez vezet. Mi ezt úgy oldottuk meg, hogy hézagoló lemezeket alkalmaztunk, melyek lehetővé tették a cinkgőz elvezetését a gőz-plazma csatornából.

Kulcsszavak: *lézersugaras hegesztés, ellenállás-hegesztés.*

Abstract

Resistance welding has long been successfully used in the automotive industry, but nowadays, there are even more advanced technologies, such as laser beam welding, which is a much faster, more economical and flexible technology. During our work, we have mapped the possibility of replacing resistance welding with laser beam welding. Furthermore, we have found a solution to the problems occurring during laser beam welding. The biggest challenge in laser beam technology is that the zinc coating on the steel plates (required to prevent corrosion) evaporates during welding, resulting in pores, and leading to a significant reduction in weld strength. We have solved that by using spacer sheets, which allow the zinc vapour to escape from the keyhole.

Keywords: *laser welding, resistance welding, spot welding.*

1. Bevezetés

A lézersugaras hegesztés számos iparágban egyre nagyobb teret hódít [1, 2]. Elterjedésének oka a kedvező technológiai paramétereiben keresendő:

- precizitás, a technológiai paraméterek pontos kézben tarthatósága;
- nagy megmunkálási sebesség;

- a munkadarabra nem hat erő;
- kiváló megmunkálási minőség (az utánmunkálási igény csökken vagy elmarad);
- széles tartományban választható és precízen szabályozható energiasűrűség a megmunkálásokban;
- kis fajlagos hőterhelés a munkadarabra;

- a megmunkálás irányától független és kopásmentes megmunkáló szerszám (fény);
- kiváló automatizálhatóság;
- gazdaságos gyártás;
- nagy gyártási rugalmasság;
- jó kombinálhatóság más technológiákkal [3].

Azonban számos kihívás adódik a lézersugaras hegesztés alkalmazása kapcsán:

Az acéllemezeket általában cinkréteggel vonják be, a korrózióállóság érdekében. A cink alacsony forráspontja következtében a hegesztés során intenzíven párolog. Így instabillá teszi a fémgőzcsatornát, valamint képes akkora gőznyomást létrehozni a varrat fölött, hogy az olvadt fém kifröcsessen a plazmacsatornából (bukdácsoló varrat). Továbbá a cinkgőzbuborékok be is épülhetnek a varratba. Ezek eredményeképpen jelentősen csökken a varratszilárdság.

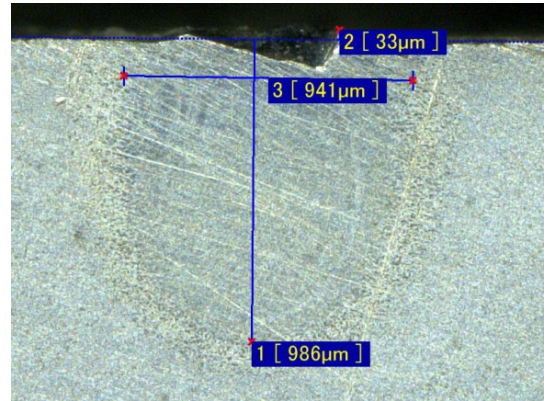
A kutatások során számos módszert próbáltak ki a cinkgőz okozta probléma kiküszöbölésére [4–23]. Azonban ezek vagy nem voltak hatékonyak, vagy pedig a gyártást tették volna túl körülményessé. Elképzelésünk szerint képlékeny alakítással apró dudorokat hozunk létre a lemez felszínén, amelyek távtartóként szolgálnak a hegesztés során. A kísérleteket hézagoló lemez megoldással végeztük, mivel hatását tekintve a két megoldás megegyezik, azonban a dudoros verzió a gyártás során, az ipari alkalmazáskor is megállja a helyét.

2. Mérési módszerek

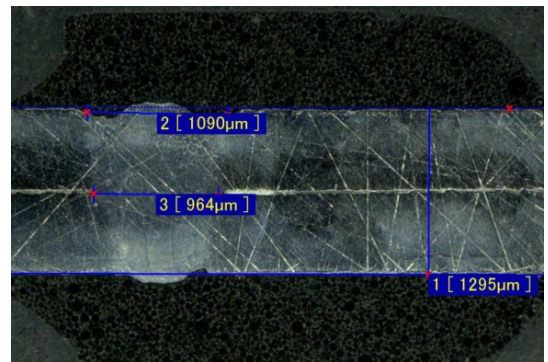
A hegesztési kísérleteket Trumpf TruLaser Cell 7020 5D lézeres megmunkáló központ, Trumpf TruDisk 4001 lézersugarforrással végeztük. Először vakvarratokat, majd hézag nélküli, végül hézagolt acéllemezpárokat hegesztettünk össze. A fontosabb hegesztési paraméterek a következők voltak: lézerteljesítmény 1000 W, hegesztési sebesség 3 m/perc [24]. A lézersugár fókuszpontját 1, illetve 4 mm-re (defókusz) állítottuk be a lemez felületéhez képest. A hegesztendő lemezek 0,6 mm vastagságú, hidegen hengerelt, kiválóan mélyhúzható, horganyzott felületűek voltak. A hézagoló lemezek vastagsága 0,1 mm-es volt. A hegesztés során a lemezeket a középük helyezett hézagoló lemezzel együtt összeszorítottuk. A metallográfiai vizsgálatokhoz vízűtéses tárcsavágóval daraboltuk el a lemezeket, majd megcsiszoltuk, políroztuk, végül 3%-os nitaloldattal marattuk. VHX J20-as Keyence digitális fénymikroszkóppal vizsgáltuk a varratokat és készítettük a képeket.

3. Vizsgálati eredmények és kiértékelésük

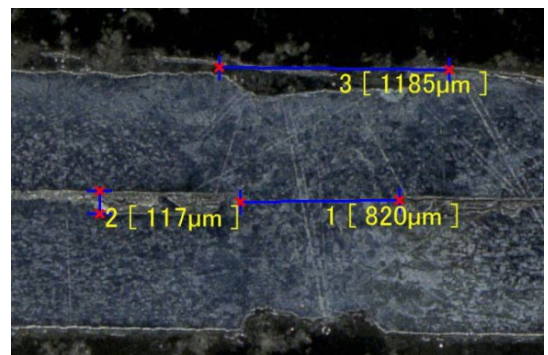
Az 1–3. ábrákon a 4 mm-es, míg a 4–6. ábrákon az 1 mm-es defókusszal hegesztett varratok metszeteiről készült fénymikroszkópos felvételek láthatók. A varratok legfontosabb méreteit az 1. táblázat tartalmazza.



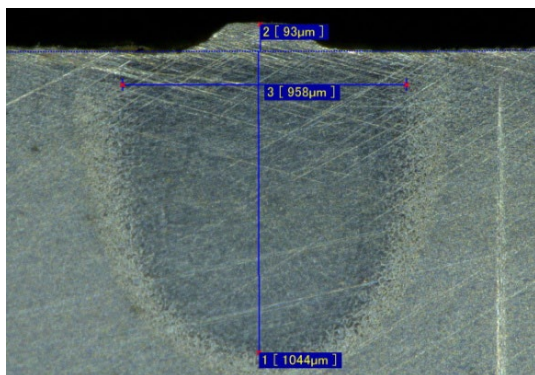
1. ábra. A vakvarrat képe 4 mm defókusz esetén



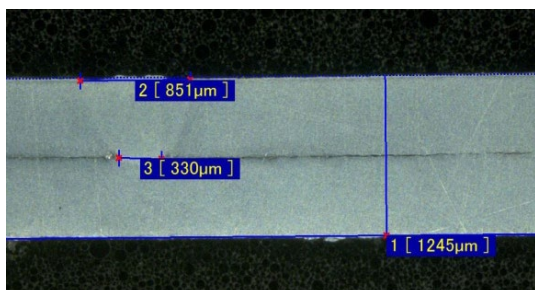
2. ábra. A hézag nélküli varrat képe 4 mm defókusz esetén



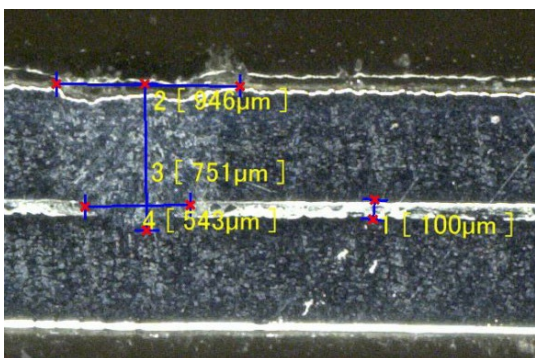
3. ábra. A hézagolt varrat képe 4 mm defókusz esetén



4. ábra. A vakvarrat képe 1 mm defókusz esetén



5. ábra. A hézag nélküli varrat képe 1 mm defókusz esetén



6. ábra. A hézagolt varrat képe 1 mm defókusz esetén

1. táblázat. A varratok méretei

Defókusz [mm]	Típus	Varrat-mélység [µm]	Korona-szélesség [µm]
4	vakvarrat	986	941
4	hézag nélküli	-(átolvadt)	1090
4	hézaggal	-(átolvadt)	1185
1	vakvarrat	1044	958
1	hézag nélküli	732	851
1	hézaggal	751	946

A metallográfiai felvételeken látszik, hogy a két defókuszérték közül az 1 mm-es adott szebb varratképeket erre az acéltípusra. Ugyanis a többi esetben (a hézagolt és a hézag nélküli mintákon) átolvadt az alsó lemez is, mert túl nagy volt a lézer teljesítménye.

Továbbá jól megfigyelhetők 0,1 mm-es hézagok a hézagoló lemezes megoldás esetében. Kifröccsenés, pórusok nem láthatóak a hézag nélküli beállítás esetén sem, mivel a lemezek nagyon vékonyak.

4. Következtetések

A legnagyobb hátránya az ellenállás-ponthegesztésnek, hogy rugalmatlan technológia, tehát az autóiipari piacra jellemző gyors változásokhoz nem képes elég gyorsan alkalmazkodni. Az ellenállás-hegesztés lassú folyamat és költséges is, mivel a munkadarab elektródákkal történő felhevítése nagy energiabefektetést igényel.

A lézeres hegesztés (különösen a távhegesztés) esetében nagy a megmunkálási sebesség, kiválóan automatizálható, jól kombinálható más technológiákkal, nagy gyártási rugalmasság jellemző rá, precíz, nem igényel utómunkát. A beruházási költség a lézeres távhegesztés esetében nagyobb, de a gyártás sokkal gazdaságosabb vele, valamint a hegesztési paramétereket pontosan kézben lehet tartani, így garantált a jó varratminőség.

Az acélokat a korrózióállóság érdekében általában cinkréteggel vonják be, azonban ez a cinkbevonat a hegesztés során komoly gondokat okoz.

A hegesztés során cinkgőz képződik, mely beépülve a varratba porózussá teszi azt.

Továbbá a nagy cinkgőznyomás instabillá teszi a fémgőzcsatornát, valamint képes akkora gőznyomást létrehozni a varrat fölött, hogy az olvadt fém kifröccsen a plazmacsatornából (bukdácsló varrat). Ezek eredményeképp jelentősen csökken a szilárdság.

Mi úgy oldottuk meg ezt a problémát, hogy hézagoló lemezeket helyeztünk el a lemezek között, hogy a cinkgőz el tudjon távozni. Vizsgálataink során nem tapasztaltunk sem kifröccsenést, sem pórusokat.

Továbbá kikísérleteztük a megfelelő lézereparamétereiket a használandó anyagtípushoz és lemezvastagságok.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet mondani az Edutus Főiskolának és dolgozóinak, akik telephelyükön lehetővé tették kísérleteink elvégzését, valamint a Bay Zoltán

Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. azon munkatársainak, akik tanácsaikkal és segítségével támogatták a munkánkat.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Bagyinszki Gy., Bitay E.: *Hegesztéstechnika I. Eljárások és gépesítés*. Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2010.
<https://eda.eme.ro/handle/10598/15437>
- [2] Bitay E.: *Lézeres felületkezelés és modellezés*. Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár/Cluj, 2007.
<https://eda.eme.ro/handle/10598/8923>
- [3] Búza G.: *Lézersugaras technológiák I*. Edutus Főiskola, Budapest, 2012. 10.
- [4] Kyung-Min H., Yung C. S.: *Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review*. Journal of Materials Processing Technology, 245. (2017) 52–54.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.02.008>
- [5] Akhter R., Steen W. M., Cruciani D.: *Laser welding of zinc coated steel*. Proceedings of 6th International Conference Lasers in Manufacturing (1989), 105–120.
- [6] Chen G., Mei L., Zhang M., Zhang Y., Wang Z.: *Research on key influence factors of laser overlap welding of automobile body galvanized steel*. Optics & Laser Technology, 45/1. (2013) 726–733.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.05.002>
- [7] Chen H. C., Pinkerton A. J., Li, L. Liu Z., Mistry A. T.: *Gap-free fibre laser welding of Zn-coated steel on Al alloy for light-weight automotive applications*. Materials & Design, 32/2. (2011) 495–504.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.034>
- [8] Chen W., Ackerson P., Molian P.: *CO₂ laser welding of galvanized steel sheets using vent holes*. Materials & Design, 30/2. (2009) 245–251.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.05.009>
- [9] Graham M. P., Kerr H. W., Weckman D. C.: *Laser welding of Zn-coated sheet steels*, Proceedings of SPIE, 2703. (1996) 170–180.
- [10] Graham M. P., Hira D. M., Kerr H. W., Weckman D. C.: *Nd:YAG laser welding of coated sheet steel*. Journal of Laser Applications, 6/4. (1994) 212–222.
<https://doi.org/10.2351/1.4745359>
- [11] Gu H.: *Laser lap welding of zinc coated steel sheet with laser-dimple technology*. Journal of Laser Applications, 22/3. (2010) 87–89.
<https://doi.org/10.2351/1.3485596>
- [12] Lee S. J., Katayama S., Kawahito Y., Kinoshita K., Kim J. D.: *Weldability and keyhole behavior of Zn-coated steel in remote welding using disk laser with scanner head*. Journal of Laser Applications, 25/3. (2013) 032008.
<https://doi.org/10.2351/1.4795456>
- [13] Mei L., Chen G., Yan D., Xie D., Ge X., Zhang M.: *Impact of inter-sheet gaps on laser overlap welding performance for galvanised steel*. Journal of Materials Processing Technology, 226. (2015) 157–168.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.020>
- [14] Bley H., Weyand L., Luft A.: *An alternative approach for the cost-efficient laser welding of zinc-coated sheet metal*. CIRP Annals, 56/1. (2007) 17–20.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.006>
- [15] Pieters R. R. G. M., Bakels J. G., Hermans M. J. M., Den Ouden G.: *Laser welding of zinc coated steels in an edge lap configuration*. Journal of Laser Applications, 18/3. (2006) 199–204.
<https://doi.org/10.2351/1.2227022>
- [16] Iqbal S., Gualini M. M., Rehman A.: *Dual beam method for laser welding of galvanized steel: experimentation and prospects*. Optics & Laser Technology, 42/1. (2010) 93–98.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2009.05.009>
- [17] Li X., Lawson S., Zhou Y., Goodwin F.: *Novel technique for laser lap welding of zinc coated sheet steels*. Journal of Laser Applications, 19/4. (2007) 259–264.
<https://doi.org/10.2351/1.2795755>
- [18] Yih-fong T.: *Gap-free lap welding of zinc-coated steel using pulsed CO₂ laser*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 29/3–4. (2006) 287–295.
<https://doi.org/10.1007/s00170-005-2522-3>
- [19] Tzeng Y. F., Chen F. C.: *Effects of operating parameters on the static properties of pulsed laser welded zinc-coated steel*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 18/9. (2001) 641–647.
<https://doi.org/10.1007/s001700170024>
- [20] Ma J., Harooni M., Carlson B., Kovacevic R.: *Dissimilar joining of galvanized high-strength steel to aluminum alloy in a zero-gap lap joint configuration by two-pass laser welding*. Materials & Design, 58. (2014) 390–401.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.046>
- [21] Ma J., Kong F., Carlson B., Kovacevic R.: *Two-pass laser welding of galvanized high-strength dual-phase steel for a zero-gap lap joint configuration*. Journal of Materials Processing Technology, 213/3. (2013) 495–507.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.10.019>
- [22] Yang S., Kovacevic R.: *Laser welding of galvanized DP980 steel assisted by the GTAW preheating in a gap-free lap joint configuration*. Journal of Laser Applications, 21/3. (2009) 139–148.
<https://doi.org/10.2351/1.3184432>
- [23] Milberg J., Trautmann A.: *Defect-free joining of zinc-coated steels by bifocal hybrid laser welding*. Production Engineering, 3/1. (2009) 9–15.
<https://doi.org/10.1007/s11740-008-0140-2>
- [24] Kovács 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>

PP mátrixú fröccsöntött kompozitok mechanikai vizsgálatai

Mechanical Studies of Injection Molded Composites with PP Matrix

Ráthy Istvánné,¹ Pinke Péter,² Huszák Csenge³

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyag és Gyártástudományi Intézet, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék, Magyarország, Budapest

¹ rathy.istvanne@bgk.uni-obuda.hu

² pinke.peter@bgk.uni-obuda.hu

³ huszak.csenge@bgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás

A kompozitanyagok széles körű alkalmazása elsősorban azok kiváló szilárdság/tömeg arányának, korrózióállóságának és viszonylag alacsony árának köszönhető. A szálerősített kompozitok mintegy 35-40%-a hőre lágyuló polimerekből készül, amelyekben erősítőszálként leggyakrabban üveg-, szén- vagy természetes szálat alkalmaznak, míg a másik részt a szén- vagy üvegszállal erősített hőre keményedő kompozitok teszik ki. Többségüket a közlekedés- és az elektronikai iparban alkalmazzák. Az új feldolgozási technológiák nemcsak a termékek tulajdonságait javítják, hanem hozzájárulnak a költségek csökkentéséhez is.

Jelen cikkünkben polipropilén (PP) mátrixú fröccsöntött termékekből kivágott próbatestek vizsgálati eredményeit hasonlítjuk össze szabványos próbatestekkel végzett mechanikai vizsgálatok eredményeivel.

Kulcsszavak: polipropilén, kompozitok, mechanikai vizsgálatok.

Abstract

The wide use of composite materials is mainly due to their excellent strength / mass ratio, corrosion resistance and relatively low price. Approximately 35-40% of the fibre-reinforced composites are made of thermoplastic polymers in which fibreglass, carbon or natural fibres are most often used as reinforcement, while the remaining 60 – 65% is made up of high-tech carbon or glass fibre-reinforced thermosetting composites. Most of them are used in the transport and electronics industries. New processing technologies not only improve the properties of the products but also contribute to reducing costs.

In this paper, we compare the results of mechanical tests with molded standard specimens with polypropylene matrix and test results from cut-outs from injection molded products.

Keywords: polypropylene, composites, mechanical properties.

1. Bevezetés

A műanyagok ma már életünk szerves részét képezik, naponta találkozunk velük, rendszeresen használjuk őket otthon, a munkahelyünkön, az iparban, a mezőgazdaságban egyaránt. A műanyagok gyártása és felhasználása töretlenül növekszik szerte a világon. A műanyagfel-

dolgozó-ipar egyik vezető ágazata a fröccsöntés technológiája, amelynek pénzforgalma 2018-ra feltételezhetően eléri a 252 milliárd USD-t [1]. A műanyag alapú kompozitanyagok széles körű alkalmazása elsősorban a kompozitok kiváló szilárdság/tömeg arányának, korrózióállóságának és viszonylag alacsony árának köszönhető [2].

2. Mechanikai vizsgálatok

A gyakorlatban az anyagok felhasználásuk során különböző igénybevételeknek vannak kitéve. Az alapanyagok mechanikai tulajdonságait is az igénybevételnek megfelelően vizsgáljuk, illetve úgy választunk alapanyagot, hogy az adott alkalmazáshoz kielégítse az alkatrészszel szemben támasztott követelményeket. Az adott szerkezeti anyagra vonatkozó mechanikai tulajdonságok számszerű értékeit általában a szakirodalomban találhatjuk meg. Sok esetben azonban túl nagy hangsúlyt kapnak a különböző típusú és minőségű polimerek szilárdsági szakirodalmi értékei, a végfelhasználás szempontjából azonban nem csak a mechanikai tulajdonságok meghatározóak. A polimerek gyakorlati felhasználása során szinte soha nem hagyhatóak figyelmen kívül az adott anyagra ható egyéb kedvezőtlen tényezők sem. Ilyen kedvezőtlen hatások például a környezeti hatások és a hőmérséklet. A hőmérséklet jelentősen befolyásolja a polimerek valamennyi tulajdonságát. Összehasonlítási alapként általában a szobahőmérsékleten mért jellemzők szolgálnak. A mechanikai jellemzőket igen erősen befolyásolja a hőmérséklet, ennek mértéke a polimer típusától függ, sőt ezeken a polimer típusokon belül is lehet eltérés a márkanevtől és a típusjelzéstől függően [3]. Felmerült az a kérdés, hogy üzemi körülmények között sorozatgyártásban legyártott kompozittermékek közül kivágott próbatesteken elvégzett különböző mechanikai vizsgálatok mérőszámai hogyan viszonyulnak a szabványos próbatestekkel megvalósított vizsgálatok eredményeihez. Cikkünkben erre a kérdésre igyekeztünk válaszokat megfogalmazni.

2.1. Szakítóvizsgálat

Polimerek szakítóvizsgálatának az a célja, hogy meghatározza az anyag húzóerővel szembeni ellenállását, a húzószilárdságot. A vizsgálat menetét, a próbatest alakját, méretét, a kísérleti eredmények felvételét és kiértékelését az MSZ EN ISO 527-1:2012 szabvány határozza meg. A vizsgálat Zwick Z050 típusú szakítógépen történt.

Mivel a termék alakja szabványos keresztmetszet alkalmazását nem tette lehetővé, az általunk vizsgált fröccsöntött polipropilén (PP) +30% üvegszál tartalmú termékekből kivágott szakító próbatestek téglalap keresztmetszetűek (2x15 mm) voltak. A próbadarabok minimális nyúlással, szinte ridegen törtek el (1. ábra). Összesen 10 db próbatest szakítóvizsgálatát végeztük el szobahőmérsékleten.

A szakítószilárdságot az alábbi képlettel határoztuk meg.

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} [\text{MPa}] \quad (1)$$

ahol

F_{\max} a terhelő erő maximális értéke [N],

S_0 a próbatest kiinduló keresztmetszete [mm²].

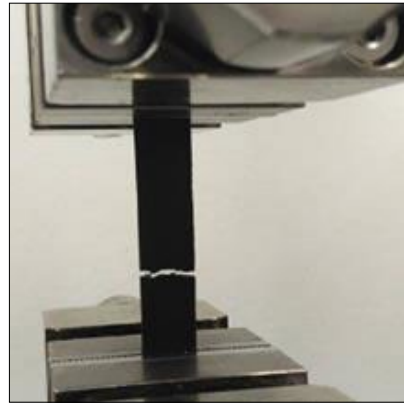
A szakítószilárdság 63–71 MPa között változott. A vizsgálat során felvett szakítógörbéket a 2. ábra mutatja.

A százalékos nyúlás értékei: $\varepsilon = 3,6\text{--}4,1\%$ között alakultak, melyeket az alábbi összefüggéssel határoztunk meg.

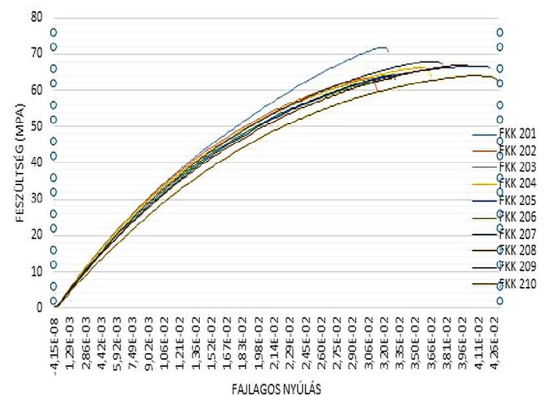
$$\varepsilon = \frac{L_U - L_0}{L_0} 100 [\%] \quad (2)$$

Az L_0 az eredeti hosszt, az L_U a megnyúlt hossz jelöli.

Szakirodalmi adatok szerint a 30%-os rövid üvegszállal erősített polipropilén kompozit szakítószilárdsága 82 MPa [3].



1. ábra. Szakító próbatest a törést követően



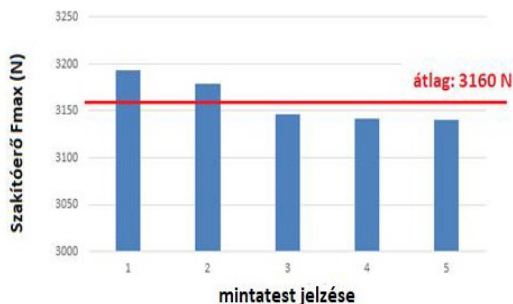
2. ábra. A próbatestek szakítódigramjai

Az általunk mért értékek és a szakirodalmi adatok közti eltérés a vizsgált PP mátrix és a szakirodalomban megadott PP mátrix adalékanyagainak lehetséges különbözőségéből ered.

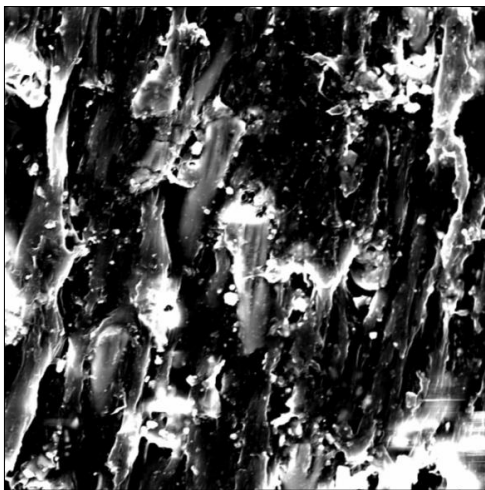
Ugyanakkor a PP +30% üvegszál tartalmú kompozitanyagból kivágott szabványos próbatetekkel is végeztünk vizsgálatokat. A maximális erők eloszlását a **3. ábra** mutatja.

Ebben az esetben a szakítószilárdság: $R_m = 79\text{--}81$ MPa között változott, a százalékos nyúlás értéke $\epsilon = 4,83\%$ volt. Ezek az értékek nagyon jól megközelítették a szakirodalmi adatokat.

Megvizsgáltuk az elszakadt felületet elektronmikroszkóppal (**4. ábra**). Látható, hogy a PP alapanyag jól tapad az üvegszálak felületéhez, ami biztosítja az alapmátrix és az üvegszál együttes teherviselését.



3. ábra. A maximális erők eloszlása



4. ábra. Az elszakított felület elektronmikroszkópi képe

2.2. Hajlítóvizsgálat

Polimereket és polimer mátrixú kompozitokat gyakran minősítenek hajlítóvizsgálattal. A hárompontos hajlítás során a hasáb alakú próbatestet kéttámaszú tartóként a középpontra ható

erővel terheltük. A vizsgálat során a terhelés a nulláról indulva folyamatosan növekszik, míg a próbatestet el nem törük. Eközben a próbatestet közepén mérésre kerül az erő (F) és a behajlás (f). A behajlásból és az erőhatás nagyságából a vizsgált próbatestet alakváltozására lehet következtetni [**3**]. Lásd az **5. ábrát**.

A hajlítószilárdság a maximális hajlítónyomaték ismeretében határozható meg az alábbi képlettel:

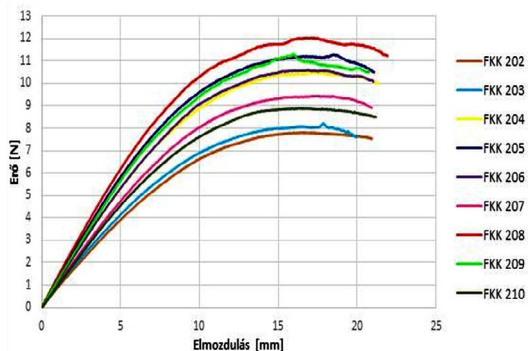
$$R_{mh} = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot L}{2 \cdot B \cdot H^2} [\text{MPa}] \quad (3)$$

A hajlító rugalmassági modulusz kiszámítása pedig a

$$E = \frac{\Delta FL^3}{4\Delta fBH^3} [\text{GPa}] \quad (4)$$

képlettel történt.

A vizsgálatot (**6. ábra**) Instron 5965 típusú gépen hajtottuk végre az EN ISO 178:2001 szabvány szerint.



5. ábra. A terhelő erő-lehajlás diagram



6. ábra. A próbatestet a hajlítóvizsgálat közben

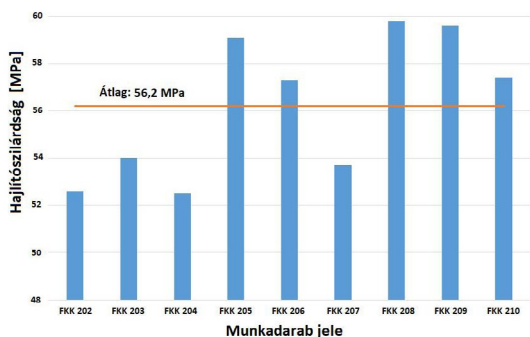
A próbatetek jelöléseit, méreteit, valamint a kiszámított hajlítószilárdságot és hajlító rugalmassági modulus értékeit az **1. táblázat** tartalmazza.

1. táblázat. Vizsgálattal meghatározott hajlítószilárdság és rugalmassági modulus értékek

Jelölés	F _{max} (N)	L (mm)	B (mm)	H (mm)	σ (MPa)	R (MPa)
FKK 202	7,8	70	7,61	1,43	52,6	1799,1
FKK 203	8,2	70	7,69	1,44	54,0	1714,3
FKK 204	8,9	70	7,91	1,50	52,5	1665,0
FKK 205	11,3	70	8,25	1,56	59,1	1674,2
FKK 206	10,6	70	8,30	1,53	57,3	1815,2
FKK 207	9,4	70	8,06	1,51	53,7	1662,7
FKK 208	12	70	8,34	1,59	59,8	1798,2
FKK 209	11,3	70	8,29	1,55	59,6	1965,4
FKK 210	10,5	70	8,21	1,53	57,4	1848,7
Átlag					56,2	1771,4

Az üvegszál nélküli polipropilén hajlítószilárdsága 37 MPa, hajlítómodulusa 1,4 GPa. A PP 30% rövid üvegszál tartalmú fröccsöntött termékből kivágott próbatest hajlítószilárdsága 52–59 MPa volt. A szakirodalom a PP+30%GF kompozitoknál a hajlítószilárdságra 120 MPa, a hajlítómodulusra 6 GPa értékeket közöl.

A hajlítószilárdság értékeit a **7. ábra** mutatja.



7. ábra. A hajlítószilárdság-értékek

2.3. Ütőmunka-vizsgálat

A dinamikus anyagvizsgálati módszerek a törést okozó igénybevételek, az adott szerkezeti anyag szívósságának meghatározására szolgálnak. A polimerek esetében a szívósság nem más, mint az energiaelnyelő képességük. A szerkezeti anya-

gnál megállapítható, hogy annak az anyagnak, amely magasabb ütési energiával rendelkezik, nagyobb a szívóssága is. A vizsgálat bemetszett és bemetszetlen próbatesteken végezhető el [4]. Az általunk használt próbatetek bemetszés nélküliek voltak. Charpy-féle ingás ütőmű berendezést alkalmaztunk, az MSZ EN ISO 179-1:2010 szabvány alapján. A próbatetek méretei a **2. táblázat**ban láthatók.

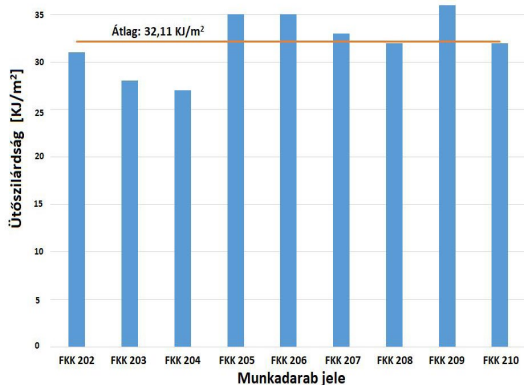
2. táblázat. Az ütőmunka-próbatetek méretei

Munkadarab jele	Szélesség (mm)	Vastagság (mm)	Keresztmetszet (mm ²)
FKK 202	3,89	3,81	14,8209
FKK 203	3,95	3,71	14,6545
FKK 204	3,85	3,79	14,5915
FKK 205	3,82	3,79	14,4778
FKK 206	3,84	3,86	14,8224
FKK 207	3,81	3,76	14,3256
FKK 208	3,71	3,86	14,3206
FKK 209	3,84	3,81	14,6304
FKK 210	3,70	3,85	14,2450

A polipropilén alapú 30% üvegszál-erősítéses kompozit vizsgálata során mért Charpy-féle ütőszilárdság-vizsgálat eredménye bemetszés nélküli próbatest esetén 4 J/cm² [5], ami 40 KJ/m²-nek felel meg. Az általunk mért, illetve számított értékeket a **3. táblázat** mutatja. Az ütőszilárdság értékei 27 és 36 KJ/m² közé estek. Az ütőszilárdsági értékek a **8. ábrán** láthatók.

3. táblázat. Ütőmunka- és ütőszilárdság-értékek

Munkadarab jele	Ütőmunka [J]	Ütőszilárdság [KJ/m ²]
FKK 202	0,46	31
FKK 203	0,41	28
FKK 204	0,40	27
FKK 205	0,52	35
FKK 206	0,52	35
FKK 207	0,48	33
FKK 208	0,47	32
FKK 209	0,53	36
FKK 210	0,45	32



8. ábra. Az ütőszilárdsági értékek átlaga

3. Következtetések

Ipari körülmények között, sorozatgyártásban legyártott munkadarabokból kivágott próbatestekkel végeztünk mechanikai vizsgálatokat. Arra a kérdésre kellett választ adnunk, hogy ezeknek a termékeknek a mechanikai tulajdonságai mennyire közelítik meg a szakirodalomban megadott értékeket.

Azt tapasztaltuk, hogy a szakítóvizsgálati eredmények nagyságrendileg megfelelnek a szabvá-

nyos próbatestekkel végzett kísérletek eredményeinek, de valamelyest kisebb értékeket mutatnak. Ez vélhetően az ipari termékben általunk nem ismert mennyiségű adalékanyagok hatásaként értelmezhető. A hajlítóvizsgálatok során nagyobb eltérések adódtak a mért és a szakirodalmi adatok között, ami szintén a PP mátrix adalékanyagok különbözőségével magyarázható. Az ütőmunka-vizsgálati eredmények jól közelítettek a szabványos próbatestekkel végzett mérések szakirodalmi adataihoz.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Transparency Market Research: *Injection Molded Plastics Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth and Forecast, 2010-2018*. <https://pitchengine.com/pitches/8f64cc4f-8df4-4314-9eeb-5e9c534da54d> (letöltve: 2017. március 1.)
- [2] Kar K. K. (szerk.): *Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations*. Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49514-8>
- [3] Szakács H., Varga Cs., Nagy R.: *Polimerek mérés-technikája*. Pannon Egyetem, Veszprém, 2012. 71–76.
- [4] Varga Cs.: *Műszaki műanyagok. 2. rész*. Pannon Egyetem, Veszprém, 2012. 24.
- [5] Czél Gy., Kollár, M.: *Anyagvizsgálati praktikum*. Sunplant Kft., 2009. 36.