

ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA

Anyagtudományi Közlemények

6. évfolyam, 2023. 1. szám



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET
Kolozsvár
2023

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



Főszerkesztő / Editor-in-Chief: Bitay Enikő

Nemzetközi Tanácsadó testület / International Editorial Advisory Board:

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

Lapszámszerkesztők / Editorial Board:

Dobránszky János, ELKH–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapest, Magyarország
 Csavdári Alexandra, Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár, Románia
 Gergely Attila, Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhely, Románia
 Kovács Tünde, Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország

Kiadó / Publisher: Erdélyi Múzeum-Egyesület

Felelős kiadó / Responsible publisher: Biró Annamária

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

Szerkesztőségi titkár / Editorial secretary: Kisfaludi-Bak Zsombor

Borítótér / Cover: Kőnczey Elemér

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

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

ISSN 2601-1883, ISSN-L 2601-1883

DOI: 10.33923/amt-2023-01

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

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

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

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

Tartalom / Content

BARABÁSSY Miklós	1
<i>A Szent Korona készítésének rekonstrukciója</i>	
<i>The reconstruction of the creation of the Holy Crown</i>	
BREZNAY Csaba, VARBAI Balázs	9
<i>Vasszenyveződés okozta korrózió vizsgálata rozsdamentes acéllemezek felületén</i>	
<i>Investigation of Corrosion Caused by Iron Contamination on the Surface of Stainless Steel Plates</i>	
DEZSŐ Gergely, SZIGETI Ferenc	14
<i>A gyártási paraméterek hatása additív gyártással készített Ti6Al4V próbatestek ütőmunkájára</i>	
<i>Effect of Production Parameters on Impact Energy of Ti-6Al-4V samples Produced by Additive Manufacturing</i>	
KÓNYA Gábor, SZABÓ Norbert, KOVÁCS Zsolt Ferenc	23
<i>GTD-111 típusú, nikkelbázisú szuperötvözet forgácsolhatóságának vizsgálata homlokmarás során</i>	
<i>Investigation of the Machinability of GTD-111 Type Nickel-Base Superalloy During Face Milling</i>	
KORSÓS Krisztián, KOVÁCS Dorina	29
<i>A plazmanitridálási hőmérséklet hatása az 1.3207 gyorsacél tulajdonságaira</i>	
<i>Effects of Plasma Nitriding Temperature on the Properties of 1.3207 Type High Speed Steel</i>	
LEDNICZKY György, WELTSCH Zoltán	33
<i>A fémfröccsöntés paramétereinek hatása a gyártott alkatrészekre</i>	
<i>Effects of Injection Moulding Parameters on the Produced Parts</i>	
PADOS Gábor, KEMÉNY Alexandra, SZOVÁK Benedek, KÁROLY Dóra, ORBULOV Imre Norbert	38
<i>Acélcsőbe töltött alumíniummátrixú szintaktikus fémhabok egylépéses gyártása</i>	
<i>Fabrication of In-situ Syntactic Aluminium Foam-Filled Steel Tubes</i>	

SAJDIK Tamás, BÁDER Mátyás	42
<i>Rostirányban tömörített faanyag nyúlási tartalékának bizonyítása húzóvizsgálatokkal</i>	
<i>Proof of the elongation reserve of longitudinally compressed wood by tensile tests</i>	
STADLER Róbert Gábor, HORVÁTH Richárd	53
<i>Akrilnitril-butadién-sztirol (ABS) lemezek kavaráó dörzshegesztésének erőtani és</i>	
<i>kötésszilárdsági vizsgálata</i>	
<i>Investigation of Welding Forces and Weld Strength for Friction Stir Welding of</i>	
<i>Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Plates</i>	
SZABÓ Valentin, VACZKÓ Dániel	59
<i>Üvegszál-erősítésű, lapos profilok ragasztott kötéseinek vizsgálata</i>	
<i>Investigation of Bonded Joints in Glass Fiber Reinforced Flat Profiles</i>	



A Szent Korona készítésének rekonstrukciója

The Reconstruction of the Creation of the Holy Crown

Barabássy Miklós

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

Abstract

Determining the place and time of an artefact's origination starts with archaeometry surveys. The aim of the study of the Holy Crown is to characterise in detail the parts of the crown – the frame, the filigree and the sockets, i.e. the metal parts – and the decorations (enamel, gemstones, beads), to determine the exact composition of the materials and to discover the place of origin. Archaeometry also includes the reconstruction of the technical and technological processes associated with artefacts. The absolute age of the artefacts can be determined using organic materials such as adhesives. This is basically a natural science. If we include the auxiliary sciences - photo-optical data recording, 3D modelling, which allows us to continue the study on the computer – it is possible to determine the relative date and place of the crown parts, using parallels with applied art, palaeography, etc. To date, no systematic archaeometry study has been carried out on the Holy Crown. There have been photographs, geometric measurements, visual inspections and descriptions by jewellers and engineers. If we want to write a scientific summary, we have a lot to draw on. The present article is such a summary, in which we attempt to reconstruct the technology of the Holy Crown, with the aim of pointing out the need for a complete archaeometry study.

Keywords: *Holy Crown, technology, archaeometry.*

Összefoglalás

Egy műtárgy elkészítési helyének és idejének a meghatározása az archeometriai vizsgálatokkal kezdődik. A Szent Korona vizsgálatának célja a korona részeinek – váz, filigránok és foglalatok, tehát a fémrészek – és díszítéseinek (zománcképek, ékkövek, gyöngyök) a részletes jellemzése, az anyagok összetételének pontos meghatározása és a származási helyének felderítése. Az archeometria része a műtárgyak technikai és technológiai folyamatainak rekonstruálása is. A készítés abszolút korának a meghatározása a szerves anyagok, például a ragasztóanyagok segítségével lehetséges. Mindez alapvetően természettudományi terület. Ha bevonjuk a segédtudományokat – a fotóoptikai adatrögzítést, a 3D-s modellkészítést, ami számítógépen engedi folytatni a tanulmányozást –, úgy az iparművészeti párhuzamok, paleográfia stb. segítségével lehetőség nyílik a koronarészek keletkezési idejének és helyének relatív meghatározására. Mindmáig nem létezik rendszer-szintű archeometriai vizsgálata a Szent Koronának. Történetek viszont fényképezések, ötvösök és mérnökök részéről geometriai mérések, vizuális vizsgálatok és leírások is, ha tehát természettudományos összefoglalót szeretnénk írni, akkor van mire támaszkodni. A jelen cikk is egy ilyen összefoglaló, amelyben megkíséreljük a Szent Korona technológiájának rekonstruálását, azzal a céllal, hogy rámutassunk: mennyire szükséges lenne egy teljes archeometriai vizsgálat elvégzése.

Kulcsszavak: *Szent Korona, technológia, archeometria.*

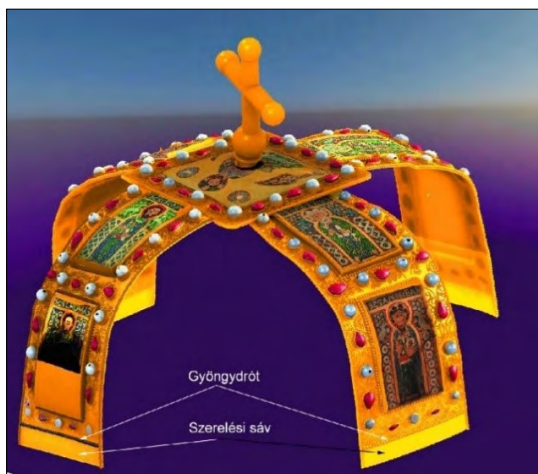
1. Bevezetés

Az **1. ábrán** látható Szent Korona két, egymástól eltérő részből áll; ezeket a **2. ábra** mutatja.

Az egyik a latin koronának is nevezett boltozat, vagyis egy keresztpánt, amely, szemrevételezéssel megítélve, tisztább (kevésbé ötvözött) anyagból készült. A keresztpántok felülete sűrűn díszített.



1. ábra. A magyar Szent Korona előlnézeti képe
(Fotó: Bence Kovács György)



2. ábra. A magyar Szent Korona két önálló szerkezeti egysége: a keresztpánt (fent) és az abronsz (lent)

A nyugat-európai és az Alpok északi ötvösműhelyeiben használt eljárásokat és stílust egységesen képviseli. A zománcképeken latin feliratok láthatók.

A másik rész a görög koronának is nevezett abronszkorona, amely a keresztpánt nélkül egy nyitott korona alakját tükrözi. Az abronsz anyaga szemmel láthatóan több ötvözőanyagot tartalmaz, mint a keresztpánt hordozólemezei. A zománcképek két, feltűnően eltérő csoportba sorolhatók. Az egyikbe tartoznak a figurális zománcképek görög felirattal, míg a többi áttetsző aszúrzománc, azaz pikkely alakú díszítőelem.

A kivitelezés nem egységes, esetenként durva; az ötvösök műhely nélküli műneke titulálták.

Az 1800-as évek kezdetétől, amikor lehetőség nyílt a nagyobb közönségnek is a koronát megismerkedni, elterjedt a görög és latin korona elnevezés, és ezzel együtt a kétkorona-elmélet. Ennek a lényege az, hogy létezett egy nyitott, Bizáncból származó korona, és egy nyugati eredetű, hozzátett boltozat. Ez előtt az az egységes hit uralkodott, hogy a Szent Korona *Szent Istvántól*, első királyunktól maradt ránk, és csak az lehetett király, akit ezzel a koronával koronáztak meg. A 13. századtól lépésről lépésre kialakul a Szent Korona-tan, ami egy jogrend és alkotmány. E szerint a legfőbb hatalom a Szent Koronáé, és már néhány száz éve a Szent Korona népe a magyar nemzet.

A Habsburg-abszolutizmus ezt nem tudta elviselni, és folyamatosan próbálta a szokásjog adta szabadságot kisebbiteni, majd a következő kommunista és szocialista kormányok is igyekeztek a Szent Korona körül kialakult tiszteletet eltörölni és ennek megfelelő alkotmányt elfogadni.

Amikor 1978 elején a Szent Korona visszakérült Magyarországra, akkor felállították egy Koronabizottságot, amely valóban tudományosan közelített a koronához, de egyes történészek – a korábbi és a korabeli politikai módszerek hatása alatt is –, megelőzve a bizottság következtetéseit, több tanulmányt, könyvet adtak ki: mindet a kétkorona-elmélet bizonygatására. Mégis sikerült egy öttagú aranyműves csoportnak [1] a koronát két alkalommal is megvizsgálni. Ők viszont a történészekkel szembemenő állásfoglalásra, vagyis az egységeskorona-elméletre jutottak. Ennek az lett az eredménye, hogy az akkori miniszter, a Koronabizottság javaslatára, mindenféle, a Szent Koronával kapcsolatos kiadványt, filmet a történészek lektorálása alá rendelt [2].

Ez a lépés odavezetett, hogy az érdeklődő társadalom két részre szakadt. Az MTA bölcsész-tudo-

mányi osztálya fémjelzi az egyik részt, a kisebbet: a kétkorona-elméletnek és annak a híveit, hogy a Szent Korona biztosan nem lehetett Szent István koronája. Ez, lássuk be, romboló hatású a Szent Korona nimbuszára. A másik részt, a nagyobbat, az ún. alternatívok képviselik, akik – bármit is mondjanak a bölcsek – a Szent Koronát ma is *Szent István* koronájának tekintik, amely ma is a magyar nemzet összetartozását és alkotmányunk alapját képezi.

Nos, ez az erős szembenállás az, ami engem elgondolkodtatott. Természetéből kifolyólag a bölcsészet nem egy egzakt tudomány, sőt, szándékosan ki is zárják az egzakt tudomány képviselőit köreiből. Véleményem szerint az egzakt tudományok bármilyen eredményre jutnak, az már nem fogja jobban lerombolni a tiszteletet, viszont lehetőség nyílna arra, hogy a megalapozott tények fényében az álláspontok közeledjenek egymáshoz.

A Szent Korona elkészítésének egyedüli bizonyítéka maga a korona. Munkám arra irányul, hogy az alkalmazott tudomány vizsgálatainak lehetőségeit felhasználva rámutassak a szakmai törvényszerűségekre, és hogy a természettudományok interdiszciplinaritását felhasználva hivatkozhatunk a mai technika kínálta vizsgálatok eredményeinek hozadékára és a bölcsész tudományok eredményei között.

2. A dolgozathoz használt kísérleti és számítási módszerek, forrásanyagok

Tervező- és technológiai mérnökként nagy gyakorlatot szereztem a mérnöki CAD-modellek létrehozásában. Első lépésként egy CAD-program segítségével létrehoztam egy 3D-s Szent Korona-modellt. Ehhez megszereztem, elsősorban *Szelényi Károly* fotográfustól, a kétszer, 20 év különbséggel készített fényképsorozatot a Szent Koronáról. Továbbá felhasználtam az aranyműves csoport által ténylegesen, tolmércével lemerít adatokat [1]. Hozzájutottam *Szvetnik Joachim* fényképeihez is [2]. A hónapokon keresztül tartó modellezés alatt lehetőségem volt megismerni ama kihívásokat, amelyekkel egy 9. és 13. század közötti ötvösnek, zománckészítőnek meg kellett küzdenie, ezért eljárási leírásokat kerestem abból a korból.

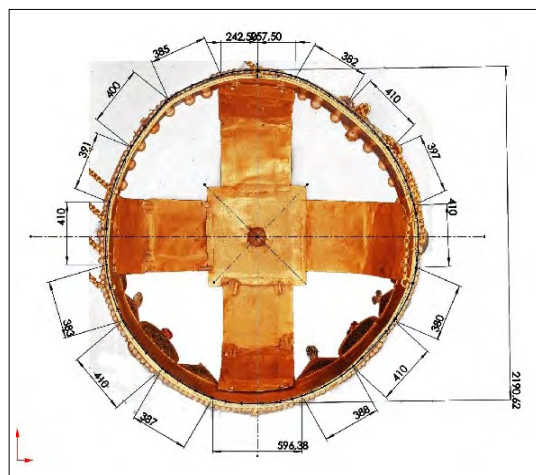
Ezen eljárásokat a 12. század elején *Theophilus* presbiter [3] foglalta össze. Itt is kiemelkedő fontosságú volt a zománckészítés megismerése és a korabeli forrasztási eljárás, amit elfelejtettek. Szerencsére *Eghart Brepohl*, a világhírű aranyműves *Theophilus* presbiter eljárásait rekonstruálta és könyvében elmagyarázta. De nagy segítség

volt *Bosselmann Ruickbie* is, aki összehasonlította *Theophilus* technológiáját a 100 évvel korábbi, bizánci aranyműves technikai leírásaival [4]. Részletes forrasztási leírást is találtam arról, amit a filigránok és a különböző foglalatok forrasztására használtak [5]. Nagy segítség volt továbbá a második otthonom, a kölni egyetemi könyvtár nyújtotta lehetőségek kihasználása.

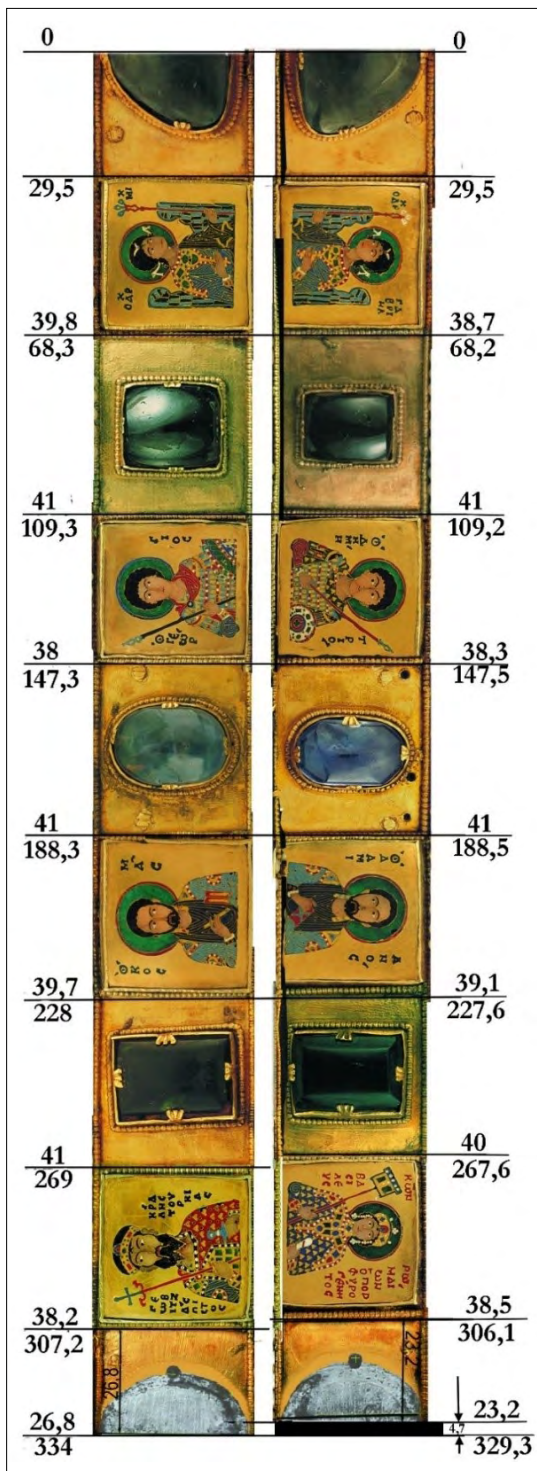
Fontos kiemelni az 1978-ban alakult Koronabizottság tevékenységét, mely komoly munkát és eredményeket tudott felmutatni. A Koronabizottság jegyzőkönyveihez is sikerült hozzájutnom *Szvetnik Joachim* mélyküti hagyatéka jóvoltából [2]. Természetesen itt nincs hely az összes forrásanyag felsorolására, de meg kell még említenem két Szent Korona-konferencia fontos anyagát: az egyik Budapesten volt 1983-ban [6], a másik Párizsban [7]. Előadásaikat kiadták, sajnos csak idegen nyelven. Később a fontosabb előadások szerkesztett változatát is közöltem az *academia.edu* felületen, ahol már több mint 100 országból követnek (15 ezernél több olvasás), többek között bizantológusok, történészek és művészettörténészek a világ egyeteméről.

Minden állítást kísérletekkel ellenőriztem. Szereztem színarany próbadarabokat, de használtam rézet is a törésvizsgálatok vagy más külső behatások tesztelésére. Ezeket részletesen bemutatom a könyvemben, melynek címe: *A Szent Korona mérnöki szemmel* [8].

Végül, de nem utolsósorban azért, hogy az állításaim tudományosságát igazoljam, készítettem egy koronamásolatot magam is, ami pontos mása az eredetinek, beleértve azokat a különlegességeket is, melyek kiemelt figyelmet érdemelnek a korona elkészítése szempontjából.



3. ábra. A keresztpánt illeszkedése az abronchhoz



4. ábra. A magyar Szent Korona abroncsa kiterítve, a díszítéseket tartó egyes részek mérete és a kerület menti helyzete a homloki rész közép-vonalától mérve értendő

3. A Szent Korona készítésének meghatározó jellegzetességei

Az abroncsgyűrű alakja csaknem kör alakú, melyhez a keresztpánt központilag van hozzáfogva (3. ábra). A további jellegzetességeket külön is tagolva ismertetem.

3.1. Az 1. jellegzetesség

A keresztpánt szárjai közötti szögek eltérőek egymástól, ilyen értelemben a keresztpánt pontatlan.

Az abroncsot 8 zománcképfoglalat nyolc ékkömezőre osztja, nagy pontossággal. Az első és hátsó ékkömezők szélesebbek, amiből arra lehet következtetni, hogy valószínűleg ez a gyűrű már koronaabroncsnak készült. A többi ékkömező szélessége megegyezik (4. ábra).

3.2. A 2. jellegzetesség

Az abroncs felosztása független minden más koronarészttől. Így az abroncsgyűrű lehetett egy félkész darab is, amit a koronakészítéshez felhasználtak.

Ha a frontmező közép-vonalától a kétoldalt lévő foglalatokat és ékkömezőket kiterítve egymás mellé helyezzük, akkor jól látható, hogy a Kon-oldal féloldalasan, 4,7 mm-rel rövidebb (4. ábra). A Kon és Dánján közti távolság 1 mm-rel keskenyebb, mint a többi ékkömező. Ez azt jelenti, hogy a kömező forraszvonálának keskenyebb oldala megnövekedett 1 mm-rel, ami optikailag csökkenti az aszimmetriát (5. ábra).



5. ábra. A szimmetriától való eltérés a hátsó mezőn

3.3. A 3. jellegzetesség

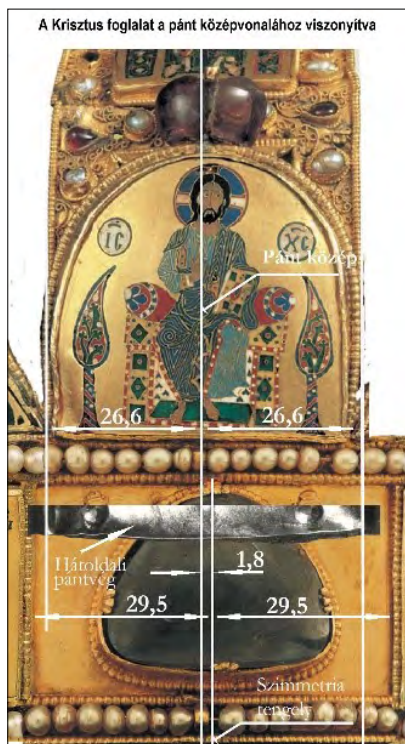
A hátsó ékkőmezőn látható keresztpántvégek forraszvonala aszimmetrikus, és a hátsó keresztpántszár középvonalában áll.

A korona hátulnézetét (5. ábra) vizsgálva feltűnik, hogy a hátsó pártaelem középvonala nem a hátsó ékkőmező középvonalában áll, hanem pontosan a keresztpánt hátsó szárá előtt, azzal egy vonalban. Az is látható, hogy a hátsó csüngőt tartó indulógyűrű is ezekkel egy vonalban áll. Ezek az eltérések azonban nem véletlenszerűek, hanem a további jellegzetességekkel függenek össze.

3.4. A 4. jellegzetesség

A hátsó pártaelem és a hátsó csüngőt tartó indulógyűrű (szaknyelven: erli) bár az abroncshoz rögzített, mégsem az abroncshoz, hanem a keresztpánt hátsó szárához igazodik.

Ez az aszimmetria megismétlődik a fronti részen is. A fronti rész központi foglalata a Krisztus-foglatat, melynek két oldalán háromszögű és íves oromzatelemek találhatók, azonos közös terjedelemben. Így ezek helyzetét a Krisztus-foglatat határozza meg, mely hasonlóan a hátsó pártaelemhez, nem a fronti (elülső) mező központi szimmetriatengelyéhez igazodik (6. ábra).



6. ábra. A fronti mezők szimmetriaeltérései

3.5. Az 5. jellegzetesség

A fronti pártázat központi Krisztus-képe a keresztpánt előrenyúló szárához igazodik, tehát az is aszimmetrikus az abroncsgyűrűhöz viszonyítva; pontosan a keresztpántszár előtt áll. De a képen az is nyomon követhető, hogy az igazgyöngy-sort tartó gyűrűk (erlik) szintén a keresztpántszár szimmetriatengelyében állnak.

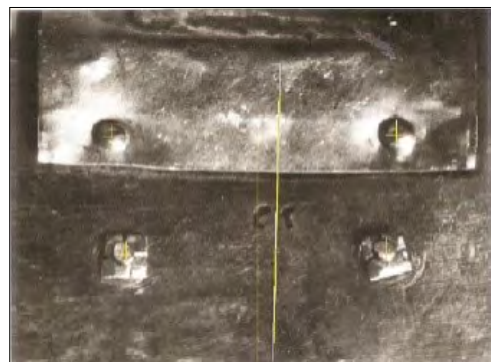
Kiegészítésként még érdemes az abroncs végeinek összeforrasztását is tanulmányozni (7. ábra).

A végeket összetartó két kis furatba sem folyt be a forrasz, és csak egy pontszerű forrasztás látható (7. ábra). Ezt az összeszereléskor szükségessé vált igazítás magyarázza. Az is látható, hogy eredetileg egy ovális ékkő volt ott, melyet ma egy nyolcszögletű helyettesít. Belülről jól láthatók az összefogásra használható lyukak (8. ábra). Az abroncs és a pánt összefogása is meglehetősen kezdetleges és utólagosnak tűnő.

A fenti jellegzetességek alapján felállítható a Szent Korona mint egyedi kézműipari termék elkészítésének technológiája. A gyártás egyes részfolyamatait rendszerbe foglaló technológiai folyamatába a 9. ábrán látható.



7. ábra. Az abroncsvég összeforrasztási helye [7]



8. ábra. A pánt rögzítése az abroncshoz, az abroncs belső oldala felől nézve [2]

4. A Szent Korona létrehozásának technológiája

A Szent Koronának van két részegysége, az abroncs gyűrűje és a keresztpánt, melyek a koronának semmilyen más részéhez nem illeszkednek, egymástól függetlenül hozták őket létre. Mint egy kalapnak, egy koronának is egyetlen fontos mérete van: az abroncs átmérője. Tehát először létre kellett hozni egy gyűrűt. A Szent Korona esetében a mai abroncs 8-as osztása mértani pontossággal történt. Ezért állíthatjuk, hogy ez még nem bizonyítja azt, hogy a keresztpánthoz készítették, de nem is zárja azt ki.

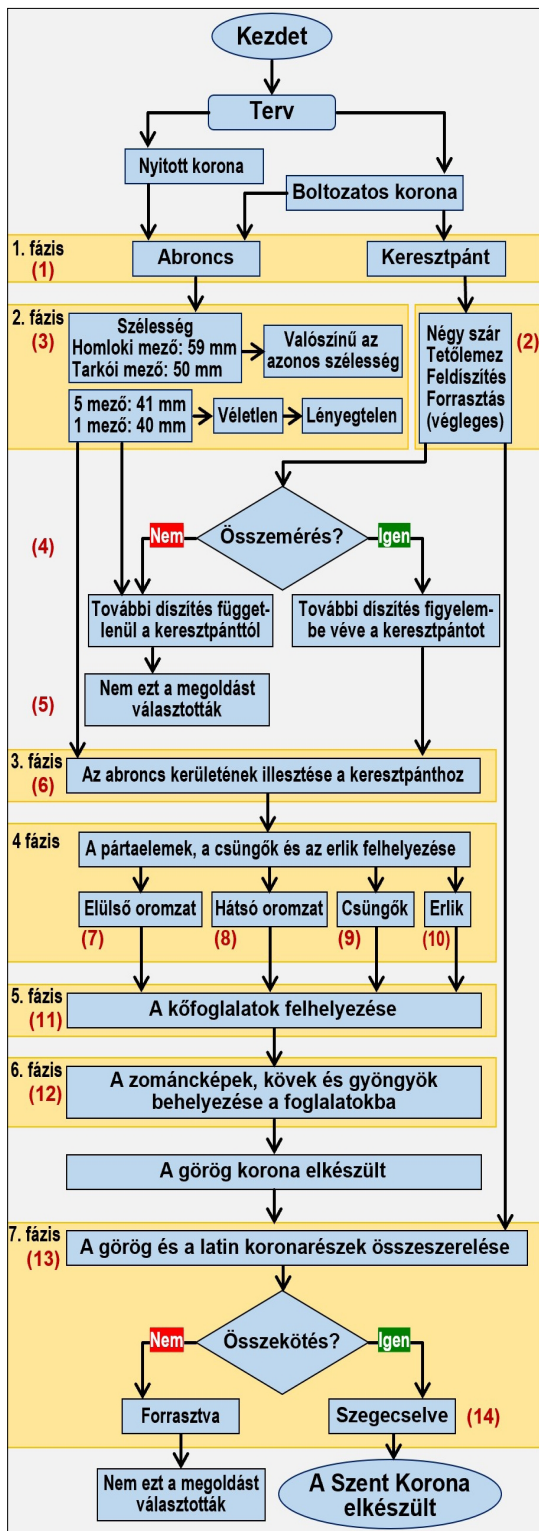
A koronaépítés következő fázisában, az előző fejezetben leírt jellegzetességek miatt, már elképzelhetetlen, hogy az abroncs díszítését a keresztpánt nélkül készíthették volna. Így a harmadik rész a párta, a csüngőket tartó gyűrűk, a hátsó, nagyméretű kő és a Krisztus-kép alatti gyöngysort tartó erlik külön koronarészt képeznek, mivel ezek az abroncsgyűrűre vannak erősítve, de a keresztpánthoz illeszkednek.

A keresztpánt díszítésének stílusa egységes, és létrehozása szintén függetlenül történt a korona más részétől. Fontos észrevenni, hogy a kivitelezésre használt eljárás magas szintű szakmai ismeretet feltételez, de a művészi megjelenítése is sokkal magasabb fokú, mint az abroncs „műhely nélküli”, eklektikus megoldása. E két részt a legutolsó lépésben fogták össze szegecseléssel. A keresztpántot hozzáértették a félkész abroncsgyűrűhöz. Ki kellett választani egy szerelési irányt, ami a korona esetében a keresztirány volt, mert ott szűkösebb a hely, és a szélesebb mezők esetében kevésbé feltűnő az aszimmetria.

Az illesztési lehetőségek a keresztpánt esetében nem terjednek ki a szárak közötti szögekre. Az abroncs illesztése is csak az abroncs hosszának a megrövidítésével, kivágással történhetett. Valóban úgy vágtak ki belőle egy darabot, hogy a végek összeforrasztása pontosan a keresztpántszár középvonalában álljanak; ezt mutatják az 5., 6. és 7. ábrák.

A hátsó pártafoglatat elem sem az alatta lévő mező középvonalában, hanem a hátsó keresztpántszár középvonalában áll. A sötét árnyalatú képen a leszerelt, jelenlegi hátsó kő mögötti rész látható az 5., 7. ábrán.

A párta központi képének (Krisztus) foglalta jól láthatóan pontosan a keresztpánt elülső szára előtt áll. De ugyanígy az is látható, hogy a gyöngysorokat tartó gyűrűk (erlik) is pontosan a keresztpánt középvonalához igazodnak (6. ábra).



9. ábra. A Szent Korona készítésének rekonstruált technológiai folyamatábrája

Természetesen a korabeli ötvösnek megvolt a lehetősége, hogy a pártát és a felsorolt egyéb díszítőelemeket az abroncs osztásához szimmetrikusan helyezze el, mégsem tette, hanem a keresztpánthoz igazította a jobb megjelenés érdekében.

A hátsó kő másodlagos. A szerelés után látható, hogy a forrasztás nagyon kezdetleges, pontszerű, és még az összefogó lyukakba sem folyt be az anyag.

A **7. ábra** és a **8. ábra** az abroncsvégek kissé ferde irányát és a szerelési furatokat mutatja kívülről és belülről. A hátsó csüngőt tartó első gyűrű a végek vonalával együtt szintén a hátsó keresztpántszár irányában áll.

5. Tézisek

A Szent Korona alsó részének elkészítése tehát nem köthető feltétlenül egy műhelyhez vagy egy pontos időhöz. A tudományosan igazolt technológiai rekonstrukcióból következik, hogy bár a pártázat, a csüngők, a gyöngysort tartó erlik és a nagyméretű kövek mind az abroncskorona részei, ezek a keresztpánthoz igazodtak. Tehát a létrehozás folyamán a párta és a csüngők felhelyezését megelőzte a keresztpánt létrehozása, hiszen ehhez igazodnak. A technológia igazolása a koronamásolat elkészítésével megtörtént. A technológiai folyamat betartásával a létrehozás bármennyiszer megismételhető, és mindig ugyanarra az eredményre jutunk. Ezzel igazolva van a tudományosság feltétele.

A megfogalmazott tézis újdonsága a leírt technológiára vonatkozik. Ennek ismeretében és felhasználásával meghatározható, hogy milyen további vizsgálatokra van szükség annak érdekében, hogy fény derüljön a Szent Korona készítésének helyére és idejére.

6. Alkalmazás

A fentebb leírt technológiai folyamat kétségbe vonja a mai fősodori, bölcsészeti véleményeket. Természetesen a humán tudományok taglalása nem lehet témája ennek a dolgozatnak, viszont a munkám először nyit megindokolt lehetőséget arra, hogy az egzakt tudományok is bekapcsolódjanak a koronakutatásba, és rámutassunk arra, hogy milyen további vizsgálatokra van szükség a Szent Korona elkészítésére vonatkozóan. Ezeket a vizsgálatokat a standard archeometria jelöli ki és határozza meg.

Ezzel kapcsolatban ki kell emelnem a műtárgyvizsgálatra széles körben elterjedt legfontosabbat, az XRF-es vizsgálatot. Az aranylemezek nyomele-

meinek ismerete elősegítheti a készítés helyének és idejének meghatározását, mivel már léteznek adatbankok a műtárgyakon elvégzett vizsgálatok után. EGYMAGUKBAN azonban nem elégségesek, itt szükség van még a művészettörténeti és a történelmi adatok ellenőrzésére is. Azonban az például eldönthető, hogy a párta és az abroncs anyaga azonos-e. Az XRF-vizsgálatok segítségével a zománcképek és az ékkövek foglalatainak kémiai összetétele megállapítható, így lehetőség nyílik arra, hogy a Szent Korona részeinek összetartozását eldöntsük. Az azonos aranyötvözetű foglalatok azonos csoportba kerülésével eldönthető, hogy mely részek készültek ugyanabban a műhelyben, nagyjából azonos időben.

Ugyanezen elgondolás mentén, ha a párta kék és zöld aszúrzománccának az anyaga megegyezik a keresztpánt apostolképein a kék és zöld zománccal, akkor valószínűsíthető, hogy az egész koronát ugyanabban a műhelyben szeltek össze.

Más, nagy tekintélyű múzeumok vizsgálatai közben találtak szerves anyagokat is. A szerves anyagok dendrokronológiai vagy szénizotópos vizsgálatával sikerülhet bizonyos javításokra vagy előállítási időre következtetni. Ezekkel a vizsgálatokkal nagymértékben hozzájárulnánk a Szent Korona elkészítési folyamatának a megismeréséhez.

7. A technológia igazolása

Az alkalmazott technológia helyességének az igazolása érdekében szükségesnek találtam koronamásolatot is készíteni. Ezt a másolatot mutatja a **10. ábra** és a **11. ábra**.

Az abroncsgyűrű pontos osztása még a korabeli eszközökkel (körző, vonalzó) sem jelentett különösebb nehézséget. Ezzel szemben a keresztpántot öt részből készítették, úgy, hogy előbb a filigránokat, a gyöngydrótot és a foglalatokat felforrasztották a száakra, illetve a tetőlemeze, majd ezután előbb szegecsekkel összefogták őket, és így forrasztották. A keresztpánt kupola alakja és összeforrasztása mindig kisebb-nagyobb pontatlansággal történik. A párta kiképzése, illetve elhelyezése előtt felvetődik a kérdés, hogy mihez igazítsák: az abroncshoz vagy a keresztpánthoz? A korabeli ötvös a keresztpántot választotta. Ha ezt a döntést minden egyes korona készítése esetében betartjuk, akkor az eredmény mindig ugyanaz lesz. Bár a párta és más díszítőelemek a „görög korona” részei, mégis a keresztpánthoz igazodnak! Ez igazolja a technológia rekonstruálásának helyességét.



10. ábra. A Szent Korona másolata szemből



11. ábra. A Szent Korona másolata hátulról

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Csomor L.: *Magyarország Szent Koronája*. Vay Ádám Múzeum Baráti Köre, Vaja, 1986. 29–34.
- [2] Szvetnik Joachim hagyatéka: Koronabizottsági jegyzőkönyvek, jegyzetek, előadások anyaga, a mélykúti könyvtárból. A polgármester engedélyével. Mélykút 2017.
- [3] Brehpohl E.: *Theophilus Presbyter und die mittelalterliche Goldschmiedekunst*. Böhlau, Wien, 1987.
- [4] Bosselmann-Ruickbie A.: *Das Verhältnis der „Schedula diversarum artium“ des Theophilus Presbyter zu byzantinischen Goldschmiedearbeiten: Grenzüberschreitende Wissensverbreitung im Mittelalter?* In: *Zwischen Kunsthandwerk und Kunst. Die „schedula diversarum artium“* (eds.: Mauriège M., Westermann-Angerhausen H., Speer A.), DeGruyter, Berlin, 2014, 333–368.
- [5] Eilbracht H.: *Filigran- und Granulationskunst im wikingischen Norden: Untersuchungen zum Transfer frühmittelalterlicher Gold- und Silberschmiedetechniken zwischen dem Kontinent und Nordeuropa*. Rheinland-Verlag, Köln, 1999.
- [6] Köpeczi B., Székely Gy., Buckton D.: *Insignia Regni Hungarie I. Studien zur Machtsymbolik des mittelalterlichen Ungarn*. Magyar Nemzeti Múzeum, Budapest, 1983.
- [7] *Acta Historiae Artium 43*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2002.
- [8] Barabássy M.: *A magyar Szent Korona mérnöki szemmel*. PenClub, Budapest, 2020.



Vasszennyeződés okozta korrózió vizsgálata rozsdamentes acéllemezek felületén

Investigation of Corrosion Caused by Iron Contamination on the Surface of Stainless Steel Plates

Breznay Csaba,¹ Varbai Balázs²

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, breznay.csaba@edu.bme.hu

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

Abstract

Corrosion caused by iron contamination, also known as rouging, is a possible type of corrosion of stainless steels. This type of corrosion is often confused with the corrosion of stainless steel itself. Rusty discoloration on the surface of a material considered corrosion resistant is a problem in the construction and pharmaceutical industries. Repairing rouging afterwards is usually costly, but can be prevented by good manufacturing practices and control.

In our research, we compared four commonly used stainless material grades with different surface treatments. We investigated the effect of scratches left by carbon steel on the surface of the samples and the time course of the process.

Keywords: *corrosion, rouging, stainless steel.*

Összefoglalás

A vasszennyeződés okozta korrózió a rozsdamentes acélok egy lehetséges korróziós károsodása. A korrózióálló acél felületén megjelenő rozsdás elszíneződés létező probléma az épített szerkezeteken és a gyógyszeripari berendezéseken. A károsodás utólagos javítása költséges, de kialakulása megfelelő gyártási eljárás és ellenőrzés mellett megakadályozható.

Kutatásunkban négy különböző, gyakran alkalmazott anyagminőségű és eltérő felületi kiképzésű rozsdamentes acél anyagminőségét hasonlítottunk össze. A kísérlet során a minták szénacél kéziszerszám okozta sérüléseit és a korróziós folyamat időbeli lefutását vizsgáltuk.

Kulcsszavak: *korrózió, vasszennyeződés okozta korrózió, rozsdamentes acél.*

1. Bevezetés

Rozsdamentes acélnak nevezzük azt a vasötvözetet, amely legalább 10,5% krómot, de legfeljebb 1,2% szén tartalmaz. A rozsdamentes acélok jellemző szövetszerkezetük alapján négy csoportba sorolhatjuk: ferrites, ausztenites, martenzites és duplex (ausztenites-ferrites) acélok. A krómnak köszönhetően kialakuló felületi (passzív) oxidréteg révén kiváló korrózióállóság alakul ki. Ahhoz, hogy a rozsdamentes acél egy adott közegben

megfelelő korrózióállóságot mutasson, a felületének tisztának, szerves és fémes szennyeződésektől mentesnek kell lennie. A korrózió az MSZ EN ISO 8044:2003 (visszavont, de az utolsó magyar nyelvű kiadás) meghatározása szerint: „A fém és a környezete közötti fizikai-kémiai kölcsönhatás, amelynek következtében a fém tulajdonságai megváltoznak, és gyakran bekövetkezik a fém, a környezet, illetve az ezekből álló műszaki rendszer funkcionális jellemzőinek a romlása” [1].

Kiemelt fontosságú az ún. vasszennyeződés okozta korrózió (rouging), amely rendszerint szénacélokkal való érintkezés útján áll elő. Leggyakrabban előforduló okai a különböző, elégtelenül megtisztított segédberendezések és szénacél szerszámok használata; az alapanyag darabolása; vegyes (szénacél és rozsdamentes) acélokat felhasználó gyártócsarnokokban való gyártás és összeszerelés. A vasszennyeződés okozta korrózió lehet egyszerűen enyhén barnás (rozsdás) elszíneződés, vagy akár felületi lyukkorrózió is [2–5]. Kísérleteink során ausztenites és duplex acélok vasszennyeződéssel szembeni korrózióállóságát vizsgáltuk.

2. Kísérleti anyagok

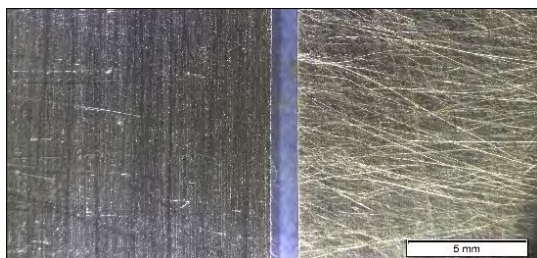
A kísérletekhez felhasznált alapanyagokat és azok felületi kiképzését, valamint a lyukkorróziós ellenállási tényezők értékét (PREN) az **1. táblázat** tartalmazza. Az 1.4301 és 1.4404 két szten-derd, széleskörűen alkalmazott ausztenites korrózióálló acél, polírozott, illetve pácolt felülettel. Az 1.4462 és 1.4362 anyagminőség duplex korrózióálló acél, kefézett, illetve pácolt felülettel.

A próbatesteket a vizsgálat megkezdése előtt két különböző módon „szennyeztük be” vassal. Az **1. ábrán** látható jobb oldali mintát drótkefével, a másikat egy kihegyezett szénacél darabbal összekarcoltuk.

A drótkefe esetében a karcok sekélyebbek, de nagyobb számban vannak jelen a minta felüle-

1. táblázat. Kísérleti anyag, azok felületi állapota és lyukkorróziós ellenállási tényezője

Anyagmin.	Felületi kiképzés	PREN
1.4301	Polírozott	18
1.4404	Pácolt, 2E	23
1.4462	Kefézett, 2E/2D	31
1.4362	Pácolt, 2E/2E	26



1. ábra. Karcolt (balra) és drótkefézett felületek, 1.4462 acél

tén, valamint a drótkeféből vas is került a minták felületére. A szénacél darabbal történő karcolás esetében a karcok mélyebbek, sűrűségük kisebb.

A mintákat a karcolást követően laboratóriumi körülmények között sósavgőzt tartalmazó atmoszférában tároltuk, a korróziós folyamat felgyorsításának céljából. A mintákról két hét, illetve két hónap után makro- és mikroszkópos felvételeket készítettünk.

3. Eredmények és kiértékelésük

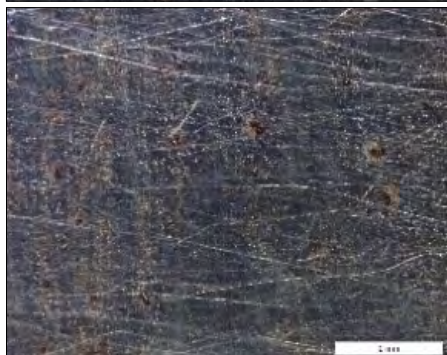
3.1. Az 1.4301-es minta korróziója

A 1.4301-es anyagminőségű polírozott felületi kiképzésű minta felületén már két hét elteltével jelentős elváltozások láthatók. A karcolt minta esetén sűrű felületi lyukkorróziót, míg a drótkefézett mintán rozsdás elszíneződést és elszórtan felületi lyukkorróziót észleltünk (**2. ábra**).

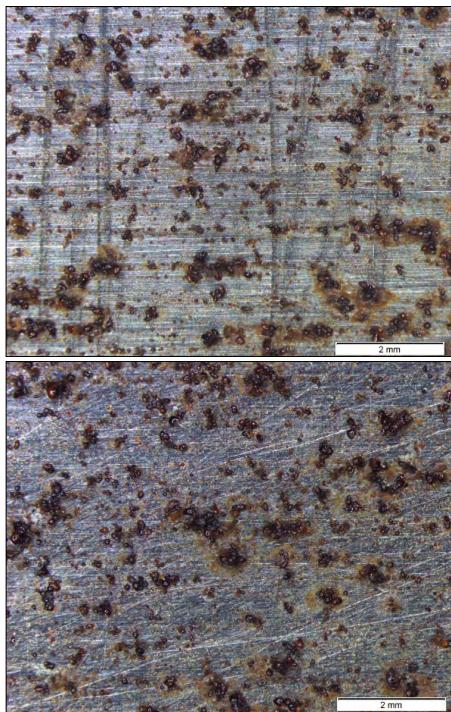
Ugyanezen minta két hónap elteltével megvizsgálva a **3. ábrán** látható.

A minta jobb szélén egy kis területet a drótkefézés előtt lemaszkoltunk, annak érdekében, hogy referenciaként összehasonlítható legyen a vassal szennyezett anyagrésszel.

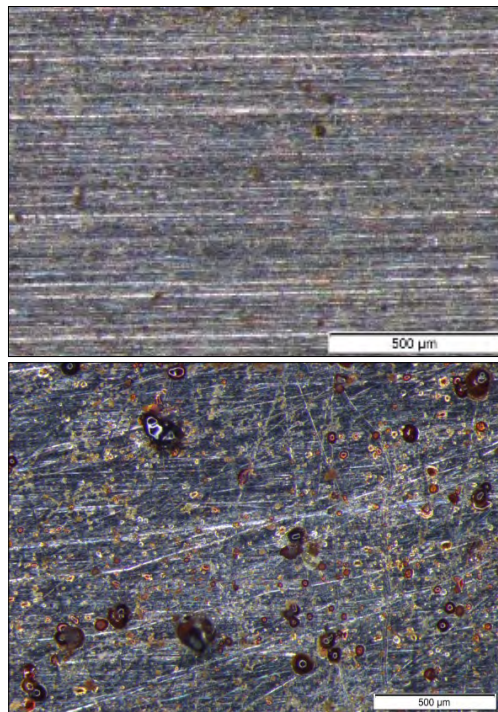
A maszkolást a drótkefézés elvégzése után eltávolítottuk.



2. ábra. Karcolt (felső) és drótkefézett (alsó kép) 1.4301 acél próbatestek felülete két hét után



3. ábra. *Karcolt (felső) és drótképezett (alsó kép) 1.4301 acél próbatestek felülete két hónap után*

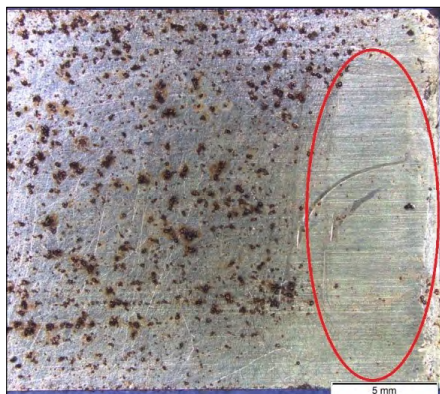


5. ábra. *Az 1.4301 acél próbatest lemaszkolt (felső) és vassal szennyezett felülete két hónap után*

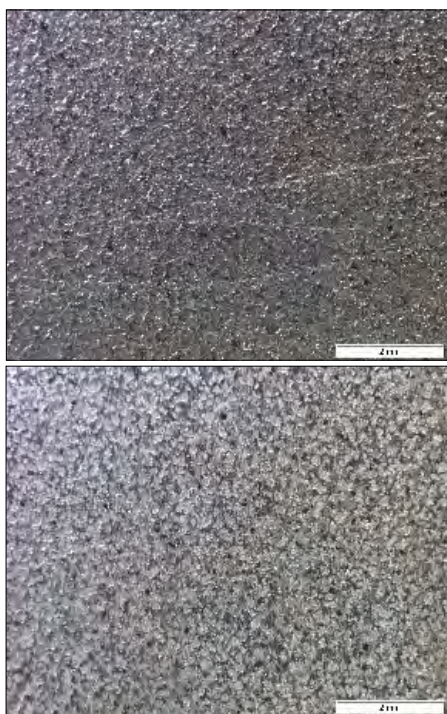
Jól látható a **4.** és **5. ábrán**, hogy a maszkolt felületen nem történt sem elszíneződés, sem lyukkorrózió. Ez a jelenség minden egyes vizsgált anyagminőség összes próbateste esetében megfigyelhető volt.

3.2. Az 1.4404 minta korróziója

Az 1.4404 minta pácolt felületén két hét elteltével csak elszórtan látható 1-1 pontban rozsdás elszíneződés (**6. ábra**).



4. ábra. *Az 1.4301 acél próbatest felülete lemaszkolt felülete két hónap után*



6. ábra. *Karcolt (balra) és drótképezett 1.4404 acél próbatestek felülete két hét után*

Két hónap elteltével azonban a minta felületén nagy mennyiségű rozsdalerakódás és lyukkorrózió figyelhető meg (7. ábra).

3.3. Az 1.4462 acél korróziója

Az 1.4462 duplex anyagminőségű minta felületi kiképzése kefézett. A többi mintától eltérő módon a felületén rozsdás elszíneződés csak a karcokban látható (8–9. ábra).

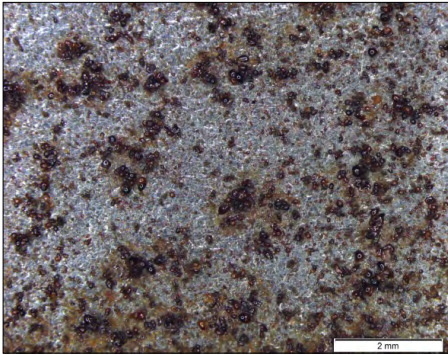
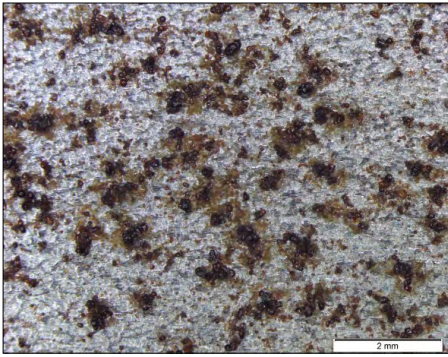
A négy vizsgált anyagminőség közül ennek az anyagnak a legnagyobb a lyukkorróziós ellenállási tényezője (PREN), a mintán felületi lyukkorrózió még nagy nagyítások mellett vizsgálva sem figyelhető meg.

3.4. Az 1.4362 minta korróziója

Az 1.4362 anyagminőségű próbatetest pácolt felületén a karcolt mintán foltokban barnás elszíneződés, a drótkefézett minta esetében egy többé-kevésbé egyenletes barnás elszíneződés látható (10–11. ábra).

4. Következtetések

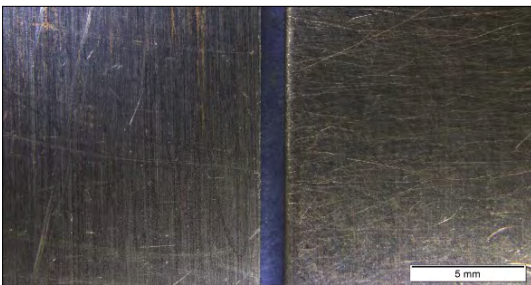
A minták felületén kialakuló rozsdá laza, a minta felületéről könnyedén letörölhető, arról kis erőhatásra leperog (12. ábra). A javítás nehézségét a felület lyukkorróziója okozza.



7. ábra. Karcolt (felső) és drótkefézett 1.4404 acél próbatestek felülete két hónap után



9. ábra. Karcolt (felső) és drótkefézett 1.4462 acél próbatestek felülete két hónap után



8. ábra. Karcolt (balra) és drótkefézett 1.4462 acél próbatestek felülete két hét után



10. ábra. Karcolt (balra) és drótkefézett 1.4362 acél próbatestek felülete két hét után

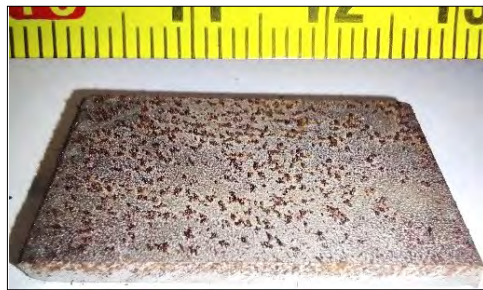


11. ábra. Karcolt (balra) és drótképezett 1.4362 acél próbatetek felülete két hónap után

Megfigyelhető, hogy a minta felületére lerakódott rozsdá mennyisége az idő előrehaladtával nő, vele együtt a felületen kialakult bemaródások száma és mélysége szintén növekszik.

Köszönetnyilvánítás

A publikáció az Európai Unió által finanszírozott ERASMUS+ Strategic Partnership Key Action 2, 2021-1-RO01-KA220-HED-000032181, ALLIES támo-



12. ábra. Az 1.4404 acél próbatest felülete két hónap után

gatásával, az Innovációs és Technológiai Minisztérium NTP-SZKOLL-22-0080 kódszámú Nemzeti Tehetség Program pályázatának, valamint a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal – NKFIH, (OTKA PD 138729) támogatásával valósult meg.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] MSZ EN ISO 8044:2003 *Fémek és ötvözetek korróziója. Alapvető szakkifejezések és fogalommeghatározások (ISO 8044:1999)*. 2003.
- [2] Crookes R.: *Rozsdamentes acélok pácolása és passziválása*. 2. kiadás, Anyagok és alkalmazások sorozat, 4. kötet, Euro Inox, Brussels, 2010.
- [3] Maller R. R.: *Passivation of stainless steel*. Trends in Food Science & Technology, 9/1. (1998).
- [4] Corbett R. A.: *Rouging – A Discoloration of Stainless Steel Surfaces*. Materials Selection & Design, 2001. 64–66.
- [5] Hornus E. C. et al.: *The Influence of Surface Iron Contamination on the Localized Corrosion Resistance of Austenitic and Duplex Stainless Steel, Studied with a Novel Rust Deposition Method*. Corrosion, 78/6. (2022).
<https://doi.org/10.5006/4067>



A gyártási paraméterek hatása additív gyártással készített Ti6Al4V próbatetek ütőmunkájára

Effect of Production Parameters on Impact Energy of Ti-6Al-4V samples Produced by Additive Manufacturing

Dezső Gergely,¹ Szigeti Ferenc

¹ University of Nyíregyháza, Institute of Engineering and Agriculture, Department of Physics and Production Engineering, Nyíregyháza, Hungary, dezso.gergely@nye.hu

Abstract

Powder bed melting is an important additive manufacturing process. The process variants are gaining more and more space in the industry: especially in the industry that produces products made of special alloys with additive manufacturing. Selective laser melting is one variant of powder bed fusion processes. In this paper experimental study on impact energy of test specimens made from Ti-6Al-4V alloy, manufactured by selective laser melting is presented. Parameter setup of experiments are defined by design of experiment method, and an empirical formula is fitted to measured data. It is pointed out that impact energy is highly sensitive to manufacturing parameters studied here, and strong interactions are also observed. A formula is derived for constrained optimization on isoenergetic surfaces. Results can be applied for control of an important material property, impact strength of parts manufactured by selective laser melting.

Keywords: *powder bed fusion, selective laser melting, impact energy, scan speed, layer thickness.*

Összefoglalás

A porágyolvasztás az additív gyártási eljárások egyik fontos típusa. A különféle eljárásváltozatai egyre nagyobb teret nyernek az iparban, főleg a különleges ötvözetekből készülő gyártmányokat additív gyártással előállító iparágban. A porágyolvasztás egyik változata a szelektív lézeres olvasztás. Ebben a tanulmányban Ti-6Al-4V alapanyagból szelektív lézeres olvasztással készített próbatetek ütőmunkájára vonatkozó kísérletek eredményeit mutatjuk be. A kísérleti paramétereket a kísérlettervezés módszerével határoztuk meg. A mérési adatokra empirikus formulát illesztettünk. Kimutattuk, hogy az ütőmunka igen érzékeny az általunk változtatott gyártási paraméterekre, valamint erős kölcsönhatások is megfigyelhetők. Olyan összefüggést származtattunk, amelynek segítségével lehetőség nyílik az ütőmunkának izoenergetikus felületek mentén történő optimalizálására. Eredményeink felhasználhatók egy fontos anyagtulajdonság, az ütőmunka beállítása a szelektív lézeres olvasztással történő gyártás során.

Kulcsszavak: *porágyolvasztás, szelektív lézeres olvasztás, ütőmunka, letapogatási sebesség, rétegvastagság.*

1. Bevezetés

A 20. század közepén megindult, robbanásszerű tudományos fejlődés eredményeképpen az additív gyártás alkalmazása egyre inkább terjed az iparban.

Sokféle szerepet tölthet be a tervezési, gyártási és karbantartási folyamatban, ideértve a proto-

típus-készítést, az öntési minták és a magok készítését, a szerszámok, fúrók vagy szerelvények (különösen összetett forma esetén) gyártását, a nyersdarabok gyártását, a végfelhasználású alkatrészek gyártását, az alkatrészek javítását. Figyelemre méltó, hogy a porágyolvasztás különféle változatai ma már a fentebb említettek közül

az első öt terület mindegyikén alkalmazhatók. Az előrejelzések szerint 2050-ig az utastér berendezésének és a gépkatrészek háromnegyede, valamint a hajtóművek alkatrészeinek fele várhatóan additív gyártással készül majd a repülőgépiparban [1]. Az additív gyártás alkalmazása az egészségügyben öt területre osztható: orvosi modellek, sebészeti implantátumok, sebészeti segédeszközök, külső támaszok és biológiai anyagok előállítása. Az additív gyártás orvosi alkalmazásairól szóló tudományos publikációk száma exponenciális növekedést mutat az elmúlt 15 évben [2, 3]. Az additív gyártási eljárásokat manapság főleg az ipar nagy hozzáadott értékű szegmenseiben alkalmazzák viszonylag kis, de növekvő mennyiségben. Az additív gyártás ma is a kutatás, az ipari tevékenység és az üzleti élet intenzív területe. Míg ez idáig több száz eljárásváltozatot fejlesztettek ki, amelyek a szakértők kreativitását és a terület ígéretes fejlesztési potenciálját jelzik, néhány kihívást meg kell oldani, mielőtt az additív gyártás széles körben elterjed, és költséghatékony gyártástechnológiává válna. Fejlesztés több tudományterületen szükséges a technológia jobb hasznosításához. Ilyen tudományterületek az oktatás és tudásmenedzsment, a tervezést támogató szoftverek, a munkatérmetet és a gyártási sebesség korlátainak leküzdése, új ötletek és eljárások a minőségirányításban, mivel a termékek jellemzői nagymértékben függenek a gyártási paramétereiktől és azok értékének véletlenszerű ingadozásaitól [4].

Az additív gyártású termékek minőségirányítása a kutatás-fejlesztés intenzív területe. Míg az additív gyártásnak általában megvan az a nagy előnye, hogy közvetlenül CAD-modellekből állít elő szinte tetszőlegesen bonyolult geometriájú termékeket, addig a minőség és a folyamatok megismételhetősége terén vannak kihívások [5, 6].

Ebben a cikkben egy kísérleti kutatást mutatunk be szelektív lézeres olvasztással (SLM) gyártott alkatrészekben. Ez egy porágyolvasztási eljárásváltozat, amely rendkívül intenzív lézerek sugárzást alkalmaz arra, hogy a fémport rétegről rétegre teljesen megolvassa a szükséges helyeken.

A fémek közül elsősorban a rozsdamentes acélok és a titánöt-vözeteket használják szelektív lézeres olvasztással történő gyártáshoz. A titánöt-vözetek iránti érdeklődés 2010 körül meredeken megnőtt, amikor bebizonyosodott, hogy biokompatibilisek. Egyre nagyobb érdeklődést kapnak továbbá a kerámiák és a kompozit anyagok [7].

A Ti6Al4V az egyik leggyakrabban használt titánöt-vözet az iparban. Ez olyan kiváló tulajdon-

ságaiból következik, mint a jó fajlagos szilárdság, a nagyfokú korrózióállóság, hogy nem mágnesezhető, és a biokompatibilitás. Ezt az anyagot gyakran alkalmazzák a járműiparban, különösen a repülőgép-alkatrészek gyártásában, a tengeri alkalmazásokban, az orvosi implantátumok készítésében, az atomreaktor-technológiában és sok más területen. Ez az anyag előgyártmány formájában kapható a hagyományos gyártási eljárásokhoz, valamint fémpor formájában az additív gyártáshoz. Ebben a tanulmányban a Ti-6Al-4V por alapanyagból additív gyártással készült próbatestekkel foglalkozunk.

Az SLM egy széles körben alkalmazott gyártási mód a Ti-6Al-4V porok feldolgozására. Az ezen alapuló technológiát alkalmazzák a legelterjedtebben, elsősorban a repüléstechnikai és az orvostechnikai ipar területén, és sokoldalúsága miatt kiemelt figyelmet kap a kutatásban is. Az SLM-mel való gyártás számos előnye mellett három kihívással kell szembenézni Ti-6Al-4V alapanyag esetén. Az első az, hogy a nagy anyag-szilárdság mellett a gyártott alkatrészeknek viszonylag kicsi az alakíthatósága. Ez korrelál a nagy hűlési sebességgel az SLM-folyamat során, ami martenzites anyagszerkezetet eredményez. A második kihívás a mikroszerkezeti hibák, például a csomók és a porozitás jelenléte, ami nagymértékben befolyásolja az alkatrészek kifáradással szembeni ellenállását. A harmadik kihívás a gyártási folyamat során fellépő, gyors hőmérséklet-változásból és nagy -gradiensből eredő maradó feszültségek jelenléte az elkészített alkatrészekben. A felsorolt kihívások mindegyike nagyszámú paramétertől függ, hiszen a teljes SLM-es gyártási folyamat akár száznál is több műszaki adattal jellemezhető. Az SLM-mel készített alkatrészek anyagtulajdonságainak alakulásában azonban három paraméter játszik különösen fontos szerepet: a lézerteljesítmény, a lézernyaláb letapogatási sebessége és a megolvasztott por rétegvastagsága. Mivel a fentebb említett három probléma jelentősen befolyásolja az alkatrészek gyakorlati és ipari felhasználását, napjainkban kiterjedt kutatás folyik ezen a területen [8, 9]. Általában utómegmunkálás is szükséges a megfelelő minőség eléréséhez. Orvosi alkalmazásokhoz különböző utómegmunkálások alkalmazhatók, például szemcseszórás, polírozás vagy ultrahangos kezelés izopropil-alkoholban [10, 11].

Az SLM-mel gyártott anyagok tulajdonságai nem egyetlen folyamatparamétertől függenek közvetlenül, hanem ezek kombinációjától. Amikor azt

kívánjuk tanulmányozni, hogy az anyagtulajdon-ságok hogyan függenek a gyártási paramétereiktől, akkor többparaméteres vizsgálatra van szükség.

Az ütmunka olyan anyagtulajdon-ság, amely szoros kapcsolatban áll a hajlékonysággal, illetve a törékenységgel. Ebben a cikkben a Ti-6Al-4V próbatetek ütmunkájával kapcsolatos kísérleti kutatási eredményeinket mutatjuk be a lézerteljesítmény, a lézer letapogatási sebessége és a rétegvastagság függvényében.

2. Az alapanyag és a próbatetek

2.1. Alapanyag

Kísérleteink során a próbateteket Ti-6Al-4V (TC4, Ti64) ötvözetből készítettük EOS Titanium Ti64ELI por szelektív lézeres olvasztásával. Ennek a pornak a kémiai összetétele 5,5–6,75% Al, 3,5–4,5% V, a fennmaradó rész titánból áll, és bizonyos elemek, mint az O, N, C, H, Fe tömegszázalékos aránya garantáltan egy bizonyos alacsony szint alatt marad. Ezt a titánötvözetet csökkentett oxigén-, nitrogén-, szén- és vastartalom, extra kis interstíciós tartalom (ELI) jellemzi, ami nagyobb rugalmasságot és a kifáradással szemben fokozott ellenálló képességet biztosít. Ezért alkalmas orvosi implantátumok és eszközök készítésére. A fémpor szemcsemérete 20–80 mikrométer között változik az adatlap szerint [12].

2.2. A próbatetek

A próbateteket EOS M290/400W berendezéssel állítottuk elő, amely fémporok szelektív lézeres olvasztását valósítja meg. A szelektív lézeres olvasztás rétegről rétegre történő gyártási folyamat, melynek két kulcslépése van: egy lemezen vagy tálcán fémporréteget alakítanak ki, majd lézernyalábbal szelektíven olvasztják a fémport a készülő alkatrészhez tartozó területeken. Ez zárt kamrában történik, amely semleges gázzal van feltöltve. Ennek a folyamatnak a fő paraméterei a rétegvastagság, a lézernyaláb oldalirányú eltolási távolsága, a lézerteljesítmény és a lézer (pásztázási) sebessége, de számos más adat beállítása is

1. táblázat. A szelektív lézeres olvasztás négy legfontosabb paraméterének neve, jele, alapértelmezett értéke az általunk használt berendezés esetén

A paraméter neve	Jelölés	Alapértelmezett érték
Lézerteljesítmény	P	280 W
Pásztázási sebesség	u	1200 mm/s
Rétegvastagság	t	0,03 mm

szükséges, például a gázáramlás, a lézernyaláb, a réteg pásztázási mintázatának, az aktuátorok mozgásának, a kamra termikus állapotának szabályozására. A paraméterek annak függvényében is változnak, hogy a modell melyik régiója készül éppen, azaz a belső (kitöltés), az alsó, a felső rész vagy annak valamelyik széle. A gép kezelőszoftvere alapértelmezett paraméterbeállítást kínál, amelyet a felhasználó módosíthat.

A minták alakja megegyezett egy szabványos, 10×10×55 mm-es Charpy-ütmőpróbatestével (szabvány: MSZ EN ISO 148-1:2017).

Minden próbatestet ugyanabban az orientációban gyártottunk. Ennek kiemelt jelentősége van olyan gyártástechnológiák esetében, amelyek a mikroszerkezetben és akár az előállított alkatrész tulajdonságaiban anizotrópiát eredményeznek. Előzetes vizsgálatot végeztünk 5-5 próbadarabbal az ütmunkára. Megállapítottuk, hogy az álló és a fektetett minták átlagértékei között 19,57%-os különbség volt. Ahogy az várható volt, a kisebb ütmunkaérték az álló helyzethez tartozik, mert ebben az esetben a törés egymásra olvadt rétegek mentén történik. A fektetett helyzetben gyártott próbadaraboknál, amikor a bevágás a felső oldalon van, a minta törésekor a rétegeknek szét kell szakadniuk.

Tanulmányunkban a gyártási paraméterek ütmunkára gyakorolt hatását vizsgáljuk. Mivel nagyszámú gyártási paraméter létezik, ezek közül három nagyon fontosat választottunk ki: a lézerteljesítményt (P), a pásztázási sebességet (u) és a rétegvastagságot (t). Ezek főbb alapértelmezett értékeit az **1. táblázat** foglalja össze.

Kísérlettervünkben minden paraméter háromszintű volt. A szintek nem egyenlő távolságra vannak, hanem egymásnak 1,2-szeresei. A **2. táblázat** a gyártási paraméterek értékeit mutatja a kísérletekben.

Az energiabevitel (e , W/mm³) a szelektív lézeres olvasztás jellemző tulajdonsága. Amint a mértékegységből is látható, ez a mennyiség valójában a fajlagos bemeneti teljesítmény, vagyis a teljesítménysűrűség: az 1 másodperc alatt 1 mm³ térfogatú fémporba besugárzott energia. A gyártási paraméterekből a következő képlettel számítható ki:

2. táblázat. A kísérletekben alkalmazott faktorok szintjei

Faktor	-1. szint	0. szint	1. szint
P (W)	233,33	280	336
u (mm/s)	1000	1200	1444
t (mm)	0,025	0,030	0,036

$$e = \frac{P}{u \cdot 1s \cdot t \cdot h} \quad (1)$$

Itt mutatkozik meg az arányosan kiválasztott szintek haszna, mivel így sok különböző paraméterkészletünk van azonos energiabevitelrel (e), ahogy a **2.** és **3. táblázat** mutatja. Így további lehetőség nyílik a kísérleti adatok kiértékelésére, figyelembe véve az energiabevitelt jellemző mennyiséget. Egy teljes faktoriális kísérlet $3^3 = 27$ különböző paraméterbeállításból állna. Ez nagy szám, ezért úgy döntöttünk, hogy egy ortogonális, részleges faktorális kísérletet tervezünk 9 kísérleti beállítással a **3. táblázat** szerint. Ez a részleges faktorális kísérletterv Taguchi $L_9(3^4)$ ortogonális tervtömbjéből származik a negyedik oszlop törlésével [13].

Az eredmények összehasonlítására és ellenőrzésére próbatesteket készítettünk további három paraméterkészlettel, beleértve az alapértelmezett paraméterbeállítást (J), a **4. táblázat** szerint. Minden paraméterbeállításához öt próbatestet állítottunk elő.

3. táblázat. A részleges faktoriális kísérletterv paraméterei és az azokhoz tartozó teljesítménysűrűség-értékek

	Lézer-teljesítmény (W)	Lézer-pásztázási sebesség (mm/s)	Réteg-vastagság (mm)	Energiabevitel (W/mm^3)
A	233,33	1200	0,03	46,296
B	280	1000	0,03	66,667
C	336	1440	0,03	55,556
D	336	1200	0,025	80,000
E	233,33	1000	0,025	66,667
F	280	1440	0,025	55,556
G	280	1200	0,036	46,296
H	336	1000	0,036	66,667
I	233,33	1440	0,036	32,150

4. táblázat. A három összehasonlító próbatest gyártási paraméterei

	Lézer-teljesítmény (W)	Lézer-pásztázási sebesség (mm/s)	Réteg-vastagság (mm)	Energiabevitel (W/mm^3)
J	280	1200	0,03	55,556
K	233,33	1000	0,03	55,555
L	280	1000	0,025	80,000

3. Eredmények és kiértékelés

3.1. A kísérleti eredmények

A Charpy-féle ütőpróbát az MSZ EN ISO 148-1:2017 szabvány szerint végeztük. Charpy PSW 15 típusú ütőművet alkalmaztunk, amelynek maximális ütési energiája 15 J és skálaállandója 0,1 J. Egyetlen kivétel van, az A-val jelölt mintasorozat, mivel ezek ütközési energiája meghaladta a 15 J-t. Emiatt ebben az esetben egy nagyobb, PSW 30-as tesztberendezést kellett alkalmaznunk.

Az ütőmunkát K betűvel jelöljük. Az ütőmunka mértékegysége ebben a cikkben Joule (J). A mérési eredményeket az **5. táblázat** mutatja.

Minden kísérlet 5 mérésből állt. Ez azt jelenti, hogy öt, azonos paraméterbeállítással gyártott próbatestet törtünk el. Ezután kiszámítottuk az ütőmunka középértékét és szórását. Kísérleteink a korrigált tapasztalati szórás értékeit tartalmazzák.

3.2. A mérési eredmények értékelése

Az ütőmunkát a kísérlet faktorainak függvényeként írjuk le:

$$K = K(P, u, t). \quad (2)$$

5. táblázat. A mérési eredmények bemutatása.

Az oszlopokban a próbatestek kódjai (1. oszlop), a mérési eredmények J egységben (2–6. oszlop), az átlag és a szórás (7–8. oszlopok) látható

Minta azonosító	1	2	3	4	5	Átlag	Korrigált tapasztalati szórás
A	18,0	18,0	16,0	16,0	16,0	16,8	1,10
B	15,0	13,7	14,6	11,9	13,9	13,8	1,19
C	10,2	10,3	10,7	10,2	11,4	10,6	0,51
D	8,4	8,2	10,1	8,9	8,3	8,8	0,79
E	11,0	9,8	8,6	9,5	10,2	9,8	0,88
F	12,7	10,0	11,3	10,8	11,6	11,3	1,00
G	12,8	14,2	12,6	13,0	14,3	13,4	0,81
H	11,3	11,7	11,3	11,1	10,6	11,2	0,40
I	11,3	10,2	10,2	11,7	12,2	11,1	0,90
J	11,4	9,6	10,4	12,1	11,7	11,0	1,02
K	11,2	10,3	10,6	11,3	9,8	10,6	0,63
L	10,3	9,1	9,0	8,6	8,9	9,2	0,65

Elsődleges célunk az volt, hogy empirikus képletet találjunk ehhez a függvényhez. Esetünkben az interpolációs technika megfelelő, mert olyan képletet keresünk, amely megfelelően közelíti a mért ütmunkaértékeket a kísérleti paraméter-tartományon belül. Az általunk vizsgált jelenség természetéből adódóan célszerű polinomokat használni az illesztéshez. A polinom fokszámát úgy kell meghatározni, hogy elkerüljük a túlillesztést. Most 12 mért adatunk van, ami azt jelenti, hogy a harmadfokú közelítés túl magas. Következésképpen egy másodrendű polinommal közelítjük a függvényt:

$$K(P, u, t) = a_0 + a_1P + a_2u + a_3t + a_4P^2 + a_5u^2 + a_6t^2 + a_7Pu + a_8Pt + a_9ut \quad (3)$$

Az $a_0 \dots a_9$ szorzótényezők mértékegységei úgy adódnak, hogy a formula kiszámítása után az eredmény mértékegysége J (joule) legyen. Például $[a_0] = J$, $[a_1] = \frac{J}{W} = s$ és így tovább. A cikk

hátralevő részében ezeket a mértékegységeket nem tüntetjük fel a jobb olvashatóság érdekében.

A K függvényben szereplő $a_0 \dots a_9$ ismeretlen szorzótényezőket kiszámítására a Scilab szoftvert használtuk. A legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztuk a K függvény közelítésére. A Scilab programrendszerben az OPTIM függvény segítségével végezhető el a nemlineáris illesztés. Ehhez szükség van a közelítő függvény alakjának és gradiensének megadására és az eljárás lefutását szabályozó néhány változó értékének beállítására. A feladat, amit megoldunk, egy általános, nemlineáris optimalizálási feladat egyetlen, sima célfüggvénnyel, megszorítások nélkül. Az OPTIM algoritmus az L-BFGS módszert használja az optimalizálásra [14].

A nemlineáris optimalizálási algoritmus lefuttatásával az alábbi empirikus függvényt kaptuk a K ütmunkára:

$$K(P, u, t) = -70,745933 - 0,0008086 P + 0,1064481 u + 1329,3723 t - 0,0001446 P^2 - 0,0000315 u^2 - 93,507847 t^2 + 0,0000201 Pu + 0,908954 Pt - 1,1531936 ut \quad (4)$$

A szorzótényezők értékei ebben a képletben azt mutatják, hogy egy bizonyos tényező (P , u , t) és a tényezők kölcsönhatásai (Pu , Pt , ut) milyen erősen befolyásolják az ütmunkát (K). Minél nagyobb a szorzó, annál érzékenyebb az ütmunka a szorzótényezőre vagy kölcsönhatásra.

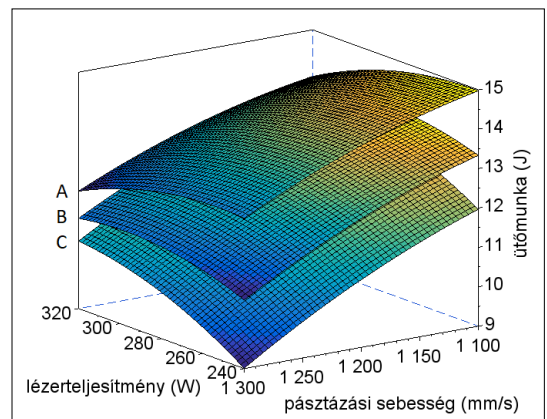
Így kaphatunk egy „iránytűt” az SLM-gépünkben olvasztott anyag ütőmunkájának szabályozására. A (4) képlettel definiált empirikus, háromváltozós függvényt az 1. ábra szemlélteti.

A függvény értelmezését megnehezíti az, hogy a P , u és t faktorok számai között nagyságrendi eltérés van. A pásztázási sebesség mm/s egységben 5 nagyságrenddel nagyobb, mint a mm-ben mért rétegvastagság. Ez azt jelenti, hogy u kis változása nagy változást eredményez K -ban, de t kis változása sokkal kisebb hatást eredményez, ha ugyanaz a szorzótényező. Más szóval a szorzótényezők nem összehasonlíthatók, ha a mellettük álló mennyiségek nem azonos nagyságrendben vannak.

A dimenziótlanítás a fizikai mennyiségek olyan formába való átalakításának szokásos módja, amelyben azok jobban összehasonlíthatók. A P , u és t tényezőket érdemes dimenzió nélküli változóval helyettesíteni, és egyben átskálázni a multiplikatív paramétereket. Vezessük be a következő, dimenzió nélküli változókat:

$$x_p = \frac{P}{280 \text{ W}}, x_u = \frac{u}{1200 \text{ m/s}}, x_t = \frac{t}{0.03 \text{ mm}} \quad (5)$$

Azt mondhatjuk, hogy az eredeti faktorokat az alapértelmezett értékükre normalizáljuk. A dimenziótlanított változók értéke éppen 1, ha az eredeti változók az alapértelmezett értéket veszik fel. Például $x_p = 1$, ha $P = 280 \text{ W}$, és $x_p = 1,2$, ha $P = 336 \text{ W}$. Ez azt jelenti, hogy a kísérleteinkben beállított gyártásparaméter-értékek mindegyike megfelel a 0,8, 1 vagy 1,2 dimenziótlanított értékek valamelyikének. Az $a_0 \dots a_9$ szorzótényezőket is skálázzuk a következőképpen:



1. ábra. A (4) empirikus formula grafikonja. A három felület a három különböző rétegvastagság-értékhez tartozik. A: $t = 0,036 \text{ mm}$, B: $t = 0,030 \text{ mm}$, C: $t = 0,025 \text{ mm}$

$$\begin{aligned}
 b_0 &= a_0, b_1 = a_1 \cdot 280 \text{ W}, b_2 = a_2 \cdot 1200 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \\
 b_3 &= a_3 \cdot 0,03 \text{ mm}, \quad b_4 = a_4 \cdot (280 \text{ W})^2, \\
 &\dots \\
 b_7 &= a_7 \cdot 280 \text{ W} \cdot 0,03 \text{ mm} \\
 b_8 &= a_8 \cdot 1200 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,03 \text{ mm}.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Minden új $b_0 \dots b_9$ szorzótényezőnek azonos a mértékegysége, ami megegyezik a K függvény mértékegységével, ami nem más, mint a joule. A dimenziótlanítás elvégzésével a következő formulát kapjuk:

$$\begin{aligned}
 K(P, u, t) &= -70,745933 - 0,226397 x_p \\
 &+ 127,73777 x_u + 39,881168 x_t \\
 &- 11,340299 x_p^2 - 45,311942 x_u^2 \\
 &- 0,0841571 x_t^2 + 6,7491589 x_p x_u \\
 &+ 7,6352133 x_p x_t - 41,51497 x_u x_t
 \end{aligned} \quad (7)$$

A (7) képletben az együtthatók összehasonlíthatók. Az elsőrendű tagokban a pásztázási sebesség és a rétegvastagság együtthatói 100-szor nagyobbak, mint a lézerteljesítményé. A tisztán másodrendű tagok rétegvastagsága két nagyságrenddel kisebb súlyú, mint a másik kettőnél. A kölcsönhatási tagok közül az $x_u x_t$ a legnagyobb együtthatójú, ugyanakkor $x_p x_u$ és $x_p x_t$ is jelentős súllyal szerepel. Ebből az áttekintésből arra következtethetünk, hogy a P , u és t gyártási paraméterek mindegyike hatással van az energiára, egyik sem elhanyagolható, de eltérő matematikai kapcsolatban állnak vele.

3.3. Az ütőmunka optimalizálása az izoenergetikus felületek mentén

Az energiabevitel, más szóval a teljesítménysűrűség, a szelektív lézeres olvasztás (SLM) fontos jellemzője. Számos jelenség erősen függ tőle, mint például a gyártási folyamat során fellépő hőmérséklet-változások, termikus feszültségek és deformációk, valamint néhány kísérőjelenség, mint a gömb alakú cseppek képződése és a fröccsenés. Azonban nem egyértelmű, hogy van-e közvetlen kapcsolat az energiabevitel és egy jelenség vagy jellemző között. Az SLM-alapú technológia optimalizálásakor sokszor több feltételnek kell teljesülnie. Ilyen helyzetben kényszerű feladat adódhat: a gyártási paramétert úgy módosítani, hogy az energiabevitel állandó maradjon, hogy megváltozzon a gyártott alkatrész anyagának egy speciális tulajdonsága, mint például az ütőmunka.

Kísérleti paraméterbeállításunkat úgy alakítottuk ki, hogy ezek közül sok azonos teljesítménysűrűségi (energiabevitel, e) értékkel szerepeljen. Ezt

arra használjuk, hogy megvizsgáljuk, hogyan függ az ütőmunka a lézernyaláb teljesítménysűrűségétől a gyártási folyamat során. A **3. és 4. táblázat** alapján azonosíthatjuk, hogy mely kísérleti összeállítások energiabevitele azonos. Ezt a **6. táblázat** foglalja össze.

A három különböző gyártási paraméter (lézerteljesítmény, pásztázási sebesség és rétegvastagság) terében az (1) képlet minden energiaértékhez meghatároz egy felületet. Az ilyen felületeket izoenergetikus felületeknek nevezzük. Ezeknek a felületeknek az egyenlete átrendezéssel származtatható:

$$t = \frac{P}{u \cdot 1s \cdot e \cdot h} \quad (8)$$

A **2. ábra** azokat az izoenergetikus felületeket mutatja, amelyek a **6. táblázat** első oszlopában találhatóak. Minden kísérleti beállítás egy pontnak felel meg valamely felületen.

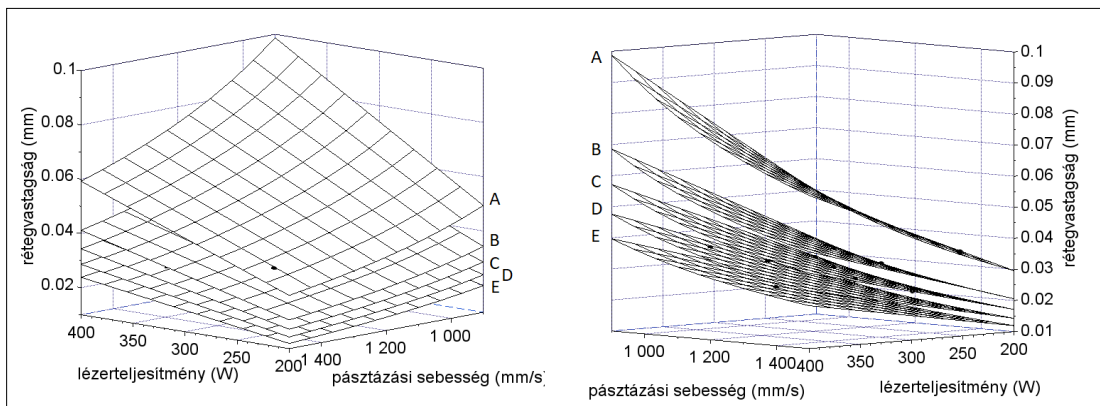
A (4) és (6) egyenletekből levezetjük az izoenergetikus felület mentén az ütközési energiára vonatkozó képletet. A rétegvastagságot (t) kiküszöböljük a (4)-ből a (6) behelyettesítésével:

$$\begin{aligned}
 K(P, u, e = \text{constant}) &= -70,745933 - 0,0008086 P \\
 &+ 0,1064481 u + 1329,3723 \frac{P}{u \cdot 1s \cdot e \cdot h} \\
 &- 0,0001446 P^2 - 0,0000315 u^2 \\
 &- 93,507847 \left(\frac{P}{u \cdot 1s \cdot e \cdot h} \right)^2 + 0,0000201 P u \\
 &+ 0,908954 \frac{P}{u \cdot 1s \cdot e \cdot h} \\
 &- 1,1531936 \frac{P}{1s \cdot e \cdot h}
 \end{aligned} \quad (9)$$

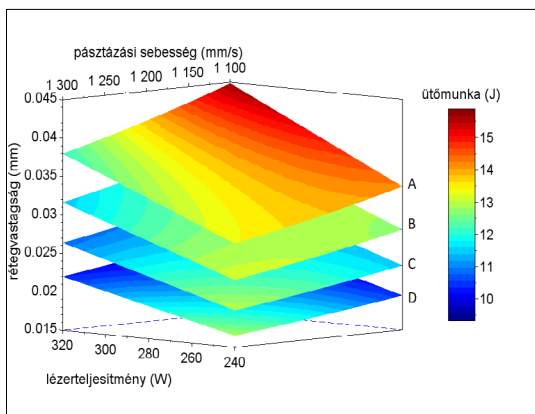
Mint korábban említettük, a vizsgálatunkban a nyalábeltolási távolság (h) is állandó. Ez a lézerteljesítmény (P) és a pásztázási sebesség (u) kétváltozós függvénye. Itt jegyezzük meg, hogy a (8) képlet helyett egy másik változó is kifejezhető és kiiktatható, így egy izoenergetikus felület mentén az ütőmunka P és t vagy t és u függvényében is kifejezhető.

A **3. ábra** a **6. táblázat** első oszlopában szereplő teljesítménysűrűségi értékekhez tartozó izoenergetikus felületek mentén mutatja az ütőmunkát a lézerteljesítmény és a pásztázási sebesség függvényében. A $32,150 \text{ W/mm}^3$ -hez tartozó izoenergetikus felületet az ábrán kihagytuk, mert csak egy kísérleti pont van rajta.

Megfigyelhető, hogy maga a teljesítménysűrűség nincs közvetlen összefüggésben az ütőmunkával. Ez azt jelenti, hogy a teljesítménysűrűség nem alkalmazható szabályozó mennyiségként, amikor az alkatrész szívósságát vagy ridegségét



2. ábra. Izoenergetikus felületek a kísérletek során változtatott (faktorként használt) gyártási paraméterek terében. A: 32,150 W/mm³, B: 46,296 W/mm³, C: 55,556 W/mm³, D: 66,667 W/mm³, E: 80,000 W/mm³, a fekete pontok a kísérleti beállításokat jelzik, mindegyik illeszkedik valamely izoenergetikus felülethez, az ábra mindkét része ugyanazt a függvényt mutatja két különböző nézetből



3. ábra. A (4) képletből számított ütmunkaértékek a kísérleteinkben faktorként használt három gyártási paraméter terében levő izoenergetikus felületek mentén. Az izoenergetikus felületek az alábbi teljesítménysűrűséghez tartoznak: B: 46,296 W/mm³, C: 55,556 W/mm³, D: 66,667 W/mm³, E: 80,000 W/mm³. A J egységben megadott ütmunkát színezéssel jeleltettük meg

6. táblázat. Azonos teljesítménysűrűséghez tartozó kísérleti beállítások

Energiabevitel, e, (W/mm ³)	Kód	Darabszám
32,150	I	1
46,296	A, G	2
55,556	C, F, J, K	4
66,667	B, E, H	3
80,000	D, L	2

kell befolyásolni. Valójában a lézerteljesítmény, a pásztázási sebesség és a rétegvastagság speciális paraméterhármását kell használni.

Lehetőség van azonban az ütmunkát a három fontos gyártási paraméter függvényében leírni, és az izoenergetikus felületek mentén kifejezni.

4. Az eredmények értékelése

Megfigyelhető, hogy a kísérleti faktorok, a lézerteljesítmény, a pásztázási sebesség és a rétegvastagság jelentősen befolyásolják a próbatest ütmunkáját.

Az A kódú minták ütmunkája kiemelkedő. Megismételtük a kísérletet, és ugyanazt az eredményt kaptuk. Ez azt jelzi, hogy az anyag belső szerkezetében lényeges változás áll be, ahogy a vizsgált folyamatparaméterek hármása az A paraméterbeállítás felé közeledik. Úgy tűnik, érdemes mélyebb vizsgálatot végezni ezzel kapcsolatban.

A kísérleti adatok interpolációjával nyert empirikus képletet óvatosan kell kezelni, mert ezek elfogadható közelítést tudnak adni a tartománynak a paraméterváltozás középpontja körüli kis részén belül. Eredményeink kibővíthetők egy jövőbeni kísérleti munkával, több kísérleti beállítással. Nagyobb számú mérés esetén az interpolációs polinom fokszáma is növelhető túlllesztés nélkül. Egy teljes harmadrendű interpolációhoz három változó esetén legalább 20 mérési pontra van szükség, de inkább többre.

A (4) képlet azt mutatja, hogy az ütmunka messze nem lineáris függvénye a lézerteljesítménynek, a pásztázási sebességnek és a rétegvastagságnak még kis paraméterablakon belül sem.

A tiszta másodrendű és vegyes tagoknak egyaránt jelentős együtthatói vannak.

A nemlineáris viselkedés mögött az SLM (és általában az additív gyártás) összetett természete feltelezhető. Az ütmunkát jelentősen befolyásolja az anyag porozitása, a metallográfiai mikroszerkezet, a felület minősége és a maradófeszültségi állapot. Mindezek a tulajdonságok a gyártási paraméterektől függenek.

5. Következtetések

A szelektív lézeres olvasztással (SLM) előállított minták ütmunkáját Charpy-féle ütművel mértük. A próbatetek különböző gyártási paraméterekkel készültek. Három gyártási paramétert, a lézerteljesítményt, a pásztázási sebességet és a rétegvastagságot változtattuk, az egyéb paraméterek állandók maradtak. A kísérletiparaméter-beállításokat a részleges faktoriális kísérlettervezés módszerével állítottuk össze.

A mérési eredmények jelentős eltéréseket mutatnak a különböző gyártási paraméterekkel készített próbatetek esetén. A legkisebb átlagérték 8,8 J, míg a legnagyobb átlagérték 16,8 J, ami több mint kétszerese az előzőnek. Ez azt jelzi, hogy az ütmunka olyan anyagtulajdonság, amely nagyon érzékeny a jelen tanulmányban vizsgált gyártási paraméterekre.

A kísérleti adatokra interpolációs eljárással kvantitatív háromváltozós tapasztalati képletet illesztettünk. Ez egy másodrendű polinomos képlet. Megfigyelhető, hogy a tiszta másodrendű és kölcsönhatási tagok együtthatói egyaránt jelentősek, ami azt jelenti, hogy az ütmunka erősen nemlineáris függvénye a gyártási paramétereknek.

Egy képletet származtattunk az izoenergetikus felületek mentén fellépő ütmunka kiszámítására. Az izoenergetikus itt azt jelenti, hogy a felület pontjai által reprezentált paraméterhármasok ugyanahhoz az energiabevitelhez (teljesítménysűrűség) tartoznak.

Mivel az ütmunka rendkívül fontos anyagjellemző, ez az empirikus képlet hasznos eszköz lehet az SLM-es gyártási paraméterek függvényében annak előrejelzésére vagy optimalizálására.

Köszönetnyilvánítás

Ezt a munkát a GINOP-2.2.1-15-2017-00055 „Implantátumok oszteoszintézisének és trabekuláris struktúrák fejlesztésének kutatása additív gyártás alkalmazásával” című pályázati projekt támogatta. A szerzők köszönetet mondanak a Debreceni Egye-

tem Biomechanikai Laboratóriumának a próbatetek gyártásáért és a Nyíregyházi Egyetem Anyagvizsgáló Laboratóriumának a mérésekért.

A dolgozat közzétételét a Nyíregyházi Egyetem Tudományos Tanácsa támogatta.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Gisario A., Kazarian M., Martina F., Mehrpouya M.: *Metal Additive Manufacturing in the Commercial Aviation Industry: A Review*. Journal of Manufacturing Systems, 53. (2019) 124–149. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005>.
- [2] Javaid M., Haleem A.: *Additive manufacturing applications in medical cases: A literature based review*. Alexandria Journal of Medicine, 54/4. (2018) 411–422. <https://doi.org/10.1016/j.ajme.2017.09.003>
- [3] Esmaeilian B., Behdad S., Wang B.: *The evolution and future of manufacturing: A review*. Journal of Manufacturing Systems, 39. (2016) 79–100. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.08.005>
- [4] Thomas-Seale L. E. J., Kirkman-Brown J. C., Attallah M. M., Espino D. M., Shepherd D. E. T.: *The barriers to the progression of additive manufacturing: Perspectives from UK industry*. International Journal of Production Economics, 198. (2018) 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.02.003>
- [5] Dezső G., Kósa P.: *Dimensional and shape accuracy of cylindrical and parallelepiped-like parts made by selective laser melting technology*. Annals of Faculty of Engineering Hunedoara, International Journal of Engineering, 18/1. (2020) 39–45.
- [6] Buican G. R., Oancea G., Lancea C., Pop M. A.: *Influence of Layer Thickness on Internal Structure of Parts Manufactured from 316-L Steel Using SLM Technology*. Applied Mechanics and Materials, 809–810. (2015) 369–374. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.369>.
- [7] Yang H. et al.: *Six-Sigma Quality Management of Additive Manufacturing*. Proceedings of the IEEE, 109/4. (2021) 347–376. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3034519>
- [8] Yap C. Y. et al.: *Review of selective laser melting: Materials and applications*. Applied Physics Reviews, 2/4. (2015) 041101. <https://doi.org/10.1063/1.4935926>
- [9] Shipley H. et al.: *Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review*. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 128. (2018) 1–20. <https://doi.org/10.1063/1.4935926>
- [10] Pacurar R., Balc N., Prem F.: *Research on how to improve the accuracy of the SLM metallic parts*. AIP Conference Proceedings, 1353/1. (2011) 1385–1390. <https://doi.org/10.1063/1.3589710>

- [11] Cosma C., Balc N., Moldovan M., Morovic L., Gogola P., Borzan C.: *Post-processing of customized implants made by laser beam melting from pure Titanium*. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 19/11–12. (2017) 738–747.
- [12] Material data sheet: EOS Titanium Ti64ELI. EOS GmbH - Electro Optical Systems, 2014. (accessed on 25 May 2021)
<https://www.sculpteo.com/media/imagecontent/EOS-Titanium-Ti64ELI.pdf>
- [13] Aoki S., Takemura A.: *Design and Analysis of Fractional Factorial Experiments From the Viewpoint of Computational Algebraic Statistics*. Journal of Statistical Theory and Practice, 6/1. (2012) 147–161.
<https://doi.org/10.1080/15598608.2012.647556>
- [14] Baudin M., Couvert V., Steer S.: *Documentation of Scilab function OPTIM*. The Scilab Consortium – Digiteo / INRIA, 2010.
https://www.scilab.org/sites/default/files/optimization_in_scilab.pdf (accessed 25 May 2021)



GTD-111 típusú, nikkelbázisú szuperötvözet forgácsolhatóságának vizsgálata homlokmarás során

Investigation of the Machinability of GTD-111 Type Nickel-Base Superalloy During Face Milling

Kónya Gábor¹, Szabó Norbert, Kovács Zsolt Ferenc

Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország, ¹konya.gabor@gamf.uni-neumann.hu

Abstract

In this paper, the authors investigate the effect of technological parameters on the face milling of GTD-111 type nickel-base superalloys. These alloys are among the most difficult to machine and are widely used as a base material for gas turbine components in the aerospace and energy industries. The aim of this paper is to determine, using the Taguchi method, those parameters that have the greatest influence on cutting force and tool wear. A rotary force meter was used to measure the cutting force and cutting torque, and then the inserts used were examined under a microscope. Results show that feed per tooth has the greatest effect on cutting forces and tool wear. In order to avoid the formation of edge deposits, it is advisable to use higher cutting speeds and compressed air cooling.

Keywords: *nickel-base superalloy, face milling, cutting force, cutting torque, tool wear, ceramic tool.*

Összefoglalás

Jelen publikációban a technológiai paraméterek hatásainak vizsgálatával foglalkoztunk GTD-111 típusú nikkelbázisú szuperötvözet homlokmarása során. Ezek az ötvözetek a legnehezebben megmunkálható anyagok közé tartoznak, melyeket széles körben használnak a repülőgép- és energetikai iparban használatos gázturbina-alkatrészek alapanyagaként. A kutatás célja Taquchi-módszerrel meghatározni, hogy mely paraméterek vannak legnagyobb hatással a forgácsolóerőre és a szerszámkopásra. A forgácsolóerő méréséhez forgó erőmérőt használtunk, mellyel a forgácsolási erő és forgácsolási nyomaték mérhető, majd a használt lapkákat mikroszkóppal vizsgáltuk. Eredményül látható, hogy a fogankénti előtolásnak van a legnagyobb hatása a forgácsolóerőkre és a szerszám-tönkremenetelre. Az élrátétképződés elkerülése érdekében érdemes a nagyobb forgácsolósebesség használata, valamint javallott a sűrített levegős hűtés alkalmazása.

Kulcsszavak: *nikkelbázisú szuperötvözet, homlokmarás, forgácsolási erő, nyomaték, szerszámkopás, kerámiaszerszám.*

1. Bevezetés

A szakirodalom négy típusú szuperötvözetet különböztet meg, a nikkel-, a kobalt-, a vas- és a titánbázisú szuperötvözeteket [1]. Ezek közül elsősorban a nikkelbázisú szuperötvözeteket használják a repülőgép- és energetikai iparban működő gázturbinákban, mert kedvező mechanikai és fizikai tulajdonságaikat nagy hőmérsékleten is biztosítják [2, 3]. Főleg a gázturbinák nagy hő-

mérsékletű zónáiban használják ezen ötvözeteket (1. ábra), ahol az üzemi hőmérséklet eléri az 1400–1500 °C-ot, míg az üzemi nyomás a 40 bar-t, s mindezt extrém korrozív környezetben, miközben az üzemi fordulatszám meghaladja a 10 000 1/min-t [4]. Ez az extrém nagy hőmérséklet a gázturbinák hatásfokának növeléséhez szükséges, hiszen a többi hőerőgéphez hasonlóan a hatásfok úgy növelhető, ha a munkaközeg maximum

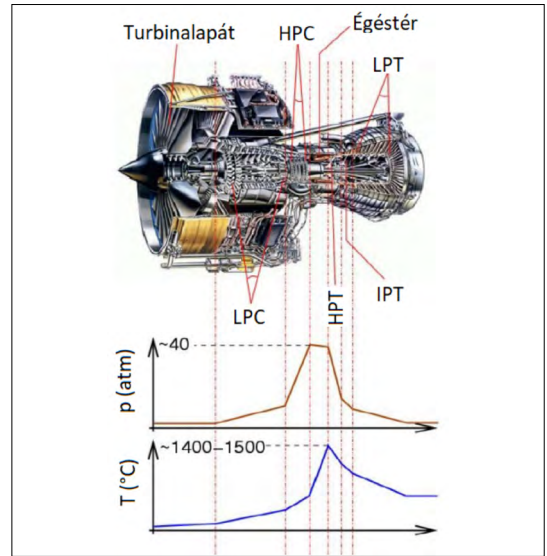
és minimum hőmérséklete közötti különbséget növeljük, ennek köszönhetően a mai gázturbinák hatásfoka megközelíti a 60%-ot [5].

Valamennyi szuperötvözet közös jellemzője a nagy melegszilárdság, a rossz hővezető képesség, a hő- és korrózióállóság. A belőlük készült alkatrészeket gyakran forgácsolással állítják elő annak ellenére, hogy tulajdonságaik alapján a különösen nehezen megmunkálható anyagok közé tartoznak [6]. Jelen kutatásban a GTD-111 típusú, nikkelbázisú szuperötvözet forgácsolhatóságának vizsgálatával foglalkoztunk homlokmarás során, mely ötvözetnek a megmunkálhatósága lényegesen rosszabb, mint a mai kutatásokban általánosan vizsgált Inconel 718-é. Az 1. táblázatban a GTD-111, az Inconel 718 és a referenci anyagként bemutatott, széles körben ismert C45 acél mechanikai és fizikai tulajdonságainak összehasonlítása látható. A tulajdonságokból adódóan a GTD-111 forgácsolása lényegesen nehezebb feladat, mint a kutatásokban általánosságban vizsgált Inconel 718-é, a C45-tel összehasonlítva a GTD-111 szakítószilárdsága több mint kétszerese, a hővezető képessége pedig csak a negyede.

A GTD-111 folyáshatárának és nyúlásának hőmérsékletfüggése a 2. ábrán tekinthető meg. Látható, hogy tulajdonságaikat nagyon nagy hőmérsékleten is megtartják, emiatt válnak oly nehezen forgácsolhatóvá [7], mivel a nagy szilárdságnak köszönhetően nagy nyíróerők ébrednek a forgácsolási zónában. A megmunkálás során keletkező nagy hőmennyiség a rossz hővezető képesség miatt nem tud a forgácsba és a munkadarabba távozni, ennek következtében a szerszám élén fog koncentrálni. Ennek hatására a szerszámok gyorsan kopnak, és gyakoriak a törések.

A megmunkálási idő rendkívül fontos a gyártásban, egyre nagyobb az igény a költséghatékony és környezetbarát megmunkálási módokra. Ez a tendencia megmutatkozik a nagy sebességű forgácsolás és keményforgácsolás elterjedésének képeben. Nemcsak a nikkelbázisú szuperötvözetek anyagtulajdonságaiból, hanem a technológiából is adódóan a gyorsacél és a forrasztott lapkás szerszámok nem alkalmasak az igények kielégítésére, így ezen a területen megjelentek a keményfém, a kerámia, a CBN (kőbős bór-nitrid) és gyémánt szerszámanyagok.

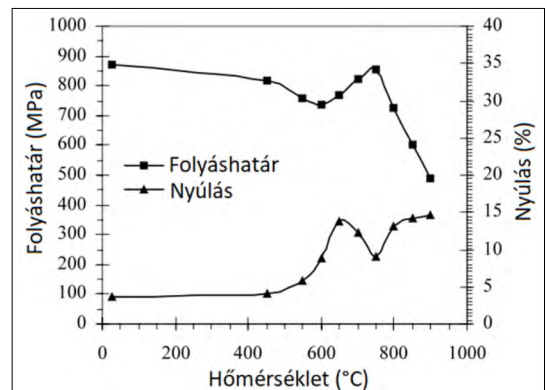
A Ni-ötvözetek forgácsolása során a legtöbb esetben keményfém szerszámokat használnak bevonat nélkül, illetve különféle bevonatokat gazdasági és technológiai korlátok miatt. Ez főképp a horonymarás, illetve egyéb, zárt alakzatok esetén mutatkozik meg, melyek megmunkálásához



1. ábra. Gázturбина, amely a különböző szakaszokat mutatja a hőmérsékleti és nyomásviszonyokkal (a [8] nyomán) (HPC – nagynyomású kompresszor rész; HPT – nagynyomású turbína)

1. táblázat. A GTD-111, az Inconel 718 és a C45 acél mechanikai és fizikai tulajdonságai [9, 10]

	GTD-111	Inconel 718	C45
Szakítószilárdság R_m (MPa)	1310	965	610
Keménység (HRC)	41,4	36	
Keménység HB			230
Nyúlás A_5 (%)	8	12	16
Sűrűség ρ (kg/m ³)	8000	8240	7700
Hővezető képesség λ (W/(m·K))	12,56	11,2	45,35



2. ábra. A GTD-111 folyáshatárának és nyúlásának hőmérsékletfüggése (a [11] nyomán)

szükséges kerámiaszerszámok csak nemrégiben jelentek meg a piacon, ráadásul csak igen magas áron érhetők el. Síkfelületek megmunkálása esetén szélesebb körben alkalmazzák a cserélhető lapkás homlokmarókat.

A kerámia forgácsolószerszám alkalmazása a jó tulajdonságai miatt indokolt, mint például nagy melegkeménység, jó kopásállóság, kis hővezető képesség és kiváló kémiai stabilitás [12]. Emiatt a szuperötvözetek forgácsolásához jó választás lehet, mivel azon a hőmérsékleten tudjuk használni, amelyen ezen ötvözetek már kilágyulnak, ezáltal a forgácsolási erő lecsökken, így a szerszámanyag kis hajlítózsilárdsága nem okoz problémát.

E kutatásban GTD-111 típusú, nikkelbázisú szuperötvözet horonymarása során alkalmazott technológiai paraméterek hatásait vizsgáltuk a fellépő forgácsolási erőkre és a lapkatönkrementelekre nézve. A cél: megtalálni azon paraméterkombinációt, mely a legkisebb szerszámterhelést és szerszámkopást eredményezi.

2. A kísérlet módszertana

E fejezetben a kísérlethez használt szerszámgép, mérőberendezések, forgácsolószerszám és a kísérlettervezés módszertanát ismertetjük.

2.1. Kísérleti környezet

A keménymarás extrém igénybevételnek teszi ki a szerszámgépet, így egy robusztus és merev szerszámgépre van szükség, ezért az NCT EmL-850D megmunkálóközpontra esett a választás.

A forgácsolási nyomaték méréséhez KISTLER 9125A24 típusú forgó erőmérőt használtunk, míg a jelfeldolgozáshoz KISTLER 5697 típusú jelfeldolgozó egységet. Az eredmények rögzítése DynoWare® szoftverrel, a kiértékelése pedig Origin-Pro 2021® szoftverrel történt. A kísérleti összeállítás a **3. ábrán** látható.

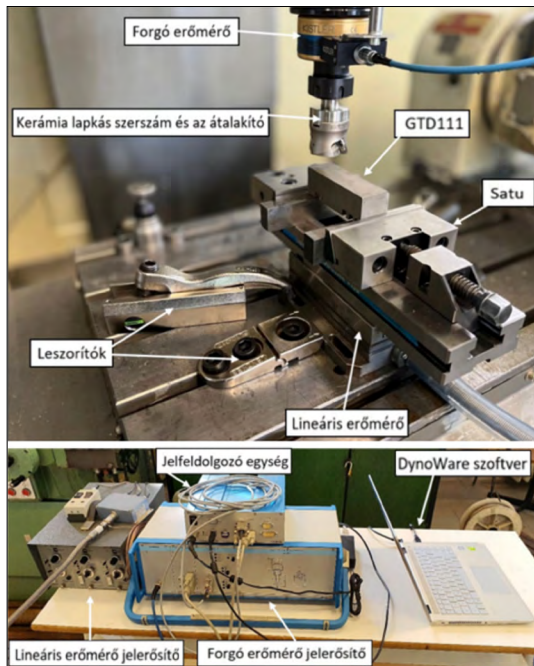
A nyomatékmérőbe a szerszámot patronos befogással lehet befogni, a homlokmaró azonban marótüskés felfogást igényel, ezért egy speciális közdarabot gyártottunk le (**4. ábra**).

2.2. A kísérlethez használt szerszám

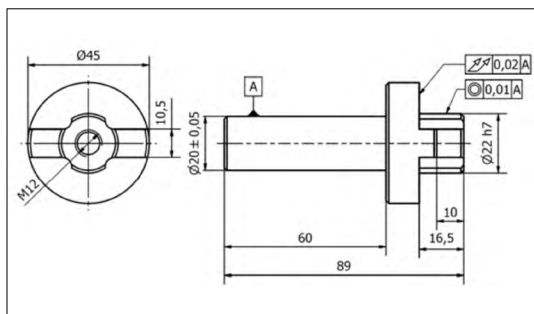
A kísérlethez TaeguTec BNGX 0904 CH-E04 típusú kerámialapkát és TaeguTec TFMBN 350-22R09CH típusú, Ø40 mm-es homlokmarót használtunk (**5. ábra**).

2.3. A kísérlethez használt technológiai paraméterek

A kísérletek elvégzése Taguchi-kísérletterv alapján történt, mely a Minitab17 szoftverrel készült.



3. ábra. Kísérleti összeállítás



4. ábra. A szerszám felfogásához szükséges közdarab műhelyrajza



5. ábra. A kísérlethez használt szerszám tartó és lapka

A meghatározott faktorok és szintek a **2. táblázat**-ban, a kísérletterv a **3. táblázat**-ban látható. Az alkalmazott technológiai paraméterek kiválasztása a gyártói ajánlás alapján történt.

A kísérletek során ellenirányú marással dolgoztunk. A kerámiaszerszámokkal történő forgácsolás esetén, főleg nehezen forgácsolható anyagokban, káros az egyenirányú marás, mivel ilyenkor a fog maximális forgácsvastagságot igyekszik leválasztani. Ez ütésszerű igénybevételként hat a szerszámra, mely a kis hajlítózsilárdsága miatt hamarabb tönkremegy. Az ellenirányú marásnál a fogásvétel nulla forgácsvastagsággal kezdődik, lényegében a szerszám vastagsága miatt hamarabb tönkremegy. Az ellenirányú marásnál a fogásvétel nulla forgácsvastagsággal kezdődik, lényegében a szerszám vastagsága miatt hamarabb tönkremegy. Az ellenirányú marásnál a fogásvétel nulla forgácsvastagsággal kezdődik, lényegében a szerszám vastagsága miatt hamarabb tönkremegy.

A forgácsleválasztási ívet tapasztalati érteken határoztuk meg, melynek értéke 70° . Az ehhez kapcsolódó forgácsolási szélesség 16,5 mm. A megmunkált hossz 130 mm minden kísérlet esetén.

2. táblázat. A kísérlettervezés során meghatározott marási faktorok és szintek

Marási faktorok		Szintek		
		1.	2.	3.
A	Forgácsolási sebesség, v_c (m/min)	600	900	1200
B	Fogankénti előtolás, f_z (mm/fog)	0,15	0,25	0,35
C	Fogásmélység, a_p (mm)	0,5	0,75	1

3. táblázat. A kísérletek során végrehajtott kísérletterv

Kísérletek sorszáma	a_p (mm)	f_z (mm/fog)	v_c (m/min)
1.	0,5	0,15	600
2.	0,5	0,25	900
3.	0,5	0,35	1200
4.	0,75	0,15	600
5.	0,75	0,25	900
6.	0,75	0,35	1200
7.	1	0,15	600
8.	1	0,25	900
9.	1	0,35	1200

3. Eredmények

Ebben a fejezetben a kísérlet során kapott eredményeket ismertetjük. A 3., a 6. és a 9. kísérlet hibás, mert nem került kiszámolásra a forgácsolási sebesség és az előtolási sebesség viszonya, így a megmunkálás során szembesültünk azzal, hogy az előtolási sebesség nagyobb volt, mint a forgácsolási sebesség. Ennek következtében a szerszámtest megsérült, ahogyan az a **6. ábrán** megfigyelhető. Így a 3., 6. és 9. kísérlet nem értékelhető.

3.1. A forgácsolási erők és nyomatékok

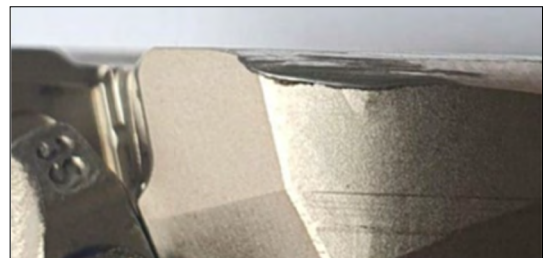
A kísérletek során mért, „z” irányú forgácsolási erők a **7–9. ábrán**, míg a forgácsolási nyomatékok a **10–12. ábrán** tekinthetők meg.

A **7–12. ábrán** látható mérési eredmények alapján megállapítható, hogy általánosan a forgácsolási erő és nyomaték egyenesen arányosan nő a fogásmélység és a fogankénti előtolás növelésével. A legkisebb szerszámterhelés az 1. kísérlet esetében figyelhető meg, míg a legnagyobb az 5. kísérlet esetén. Megállapítható, hogy legnagyobb hatása a fogankénti előtolásnak van a szerszámterhelésre nézve.

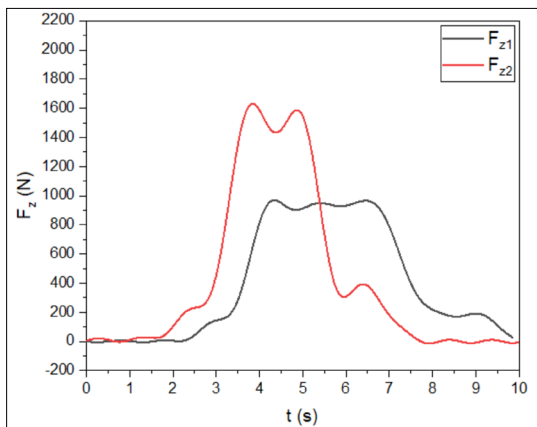
3.2. A forgácsolólapkák vizsgálata

A megmunkálás során használt lapkákról készült felvételek a **13. ábrán** láthatók. A megmunkálás során az élrátét keletkezése jellemző volt a szerszámél mentén, illetve némi kopás is megfigyelhető. Egy lapka eltört, nagy valószínűséggel a megmunkálás során ütésszerű hatás érte.

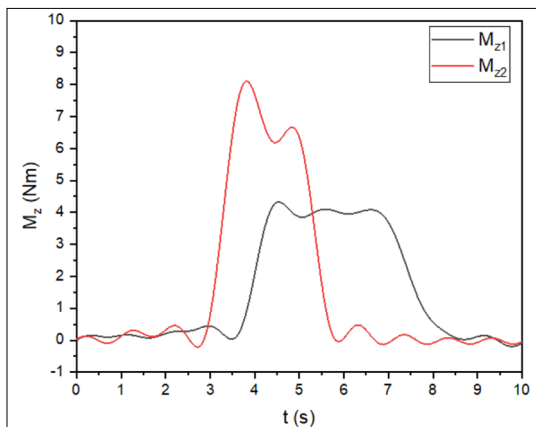
Az élrátét mértéke jelentősen csökkenthető lenne, ha sűrített levegős hűtés alkalmazására sor került volna a forgácsleválasztás javítása érdekében. Erre a célra a szerszámtestben vannak furatok kialakítva, azonban a kutatáshoz használt szerszám gép nem alkalmas ilyen hűtés használatára. Tapasztalok alapján a nagyobb forgácsolási sebesség alkalmazása a célszerű.



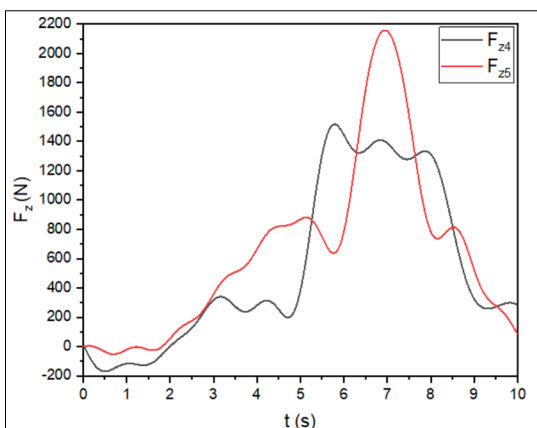
6. ábra. Sérült szerszámtest



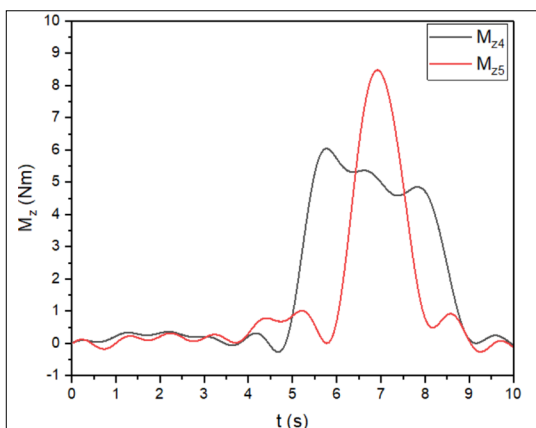
7. ábra. Az 1. és a 2. kísérlet során mért F_z forgácsolási erő a megmunkálási idő függvényében



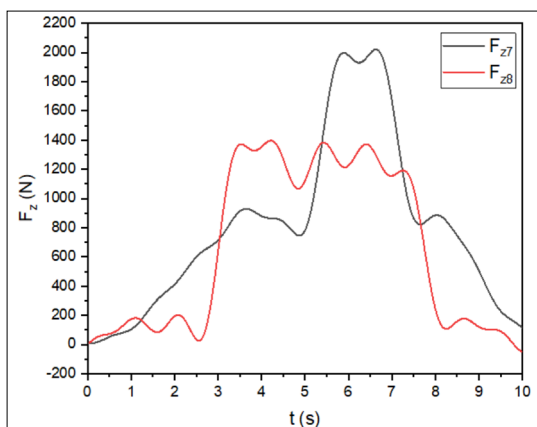
10. ábra. Az 1. és a 2. kísérlet során mért M_z forgácsolási nyomaték a megmunkálási idő függvényében



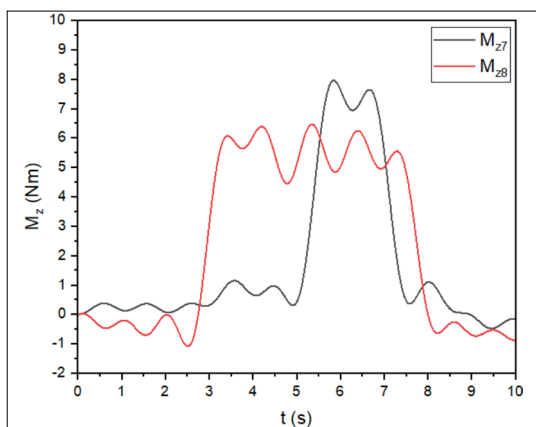
8. ábra. A 4. és az 5. kísérlet során mért F_z forgácsolási erő a megmunkálási idő függvényében



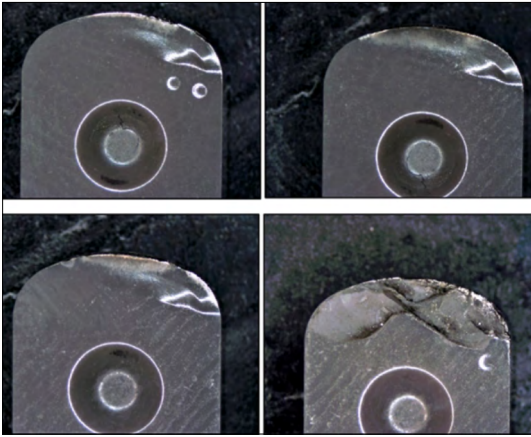
11. ábra. A 4. és az 5. kísérlet során mért M_z forgácsolási nyomaték a megmunkálási idő függvényében



9. ábra. A 7. és a 8. kísérlet során mért F_z forgácsolási erő a megmunkálási idő függvényében



12. ábra. A 7. és a 8. kísérlet során mért M_z forgácsolási nyomaték a megmunkálási idő függvényében



13. ábra. A forgácsolási kísérletek során használt lapkák felülnézeti képe

4. Összegzés

A kutatás során GTD-111 típusú, nikkeltázas szuperötvözet forgácsolhatóságát vizsgálták homlokmaráskor. Taguchi-módszer segítségével kísérletterv készült, majd a kísérletek végrehajtásakor mértük a fellépő forgácsolási erőt és nyomatékot. A következő következtetéseket lehet levonni a kísérletek kiértékelésével:

- a kísérletek végrehajtása előtt célszerű ellenőrizni a kísérletterv helyességét;
- a technológiai paraméterek közül a fogankénti előtolásnak van a legnagyobb hatása a megmunkálási folyamatra;
- az élrátétképződés elkerülése érdekében érdemes a nagyobb forgácsolási sebesség használata;
- kerámia szerszám használata esetén ajánlott a sűrített levegős hűtés alkalmazása.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Thellaputta G. R., Chandra P. S., Rao C. S. P.: *Machining of Nickel Based Superalloys: A Review*. Materials Today: Proceedings, 4/2. (2017) 3712–3721. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.02.266>
- [2] Kun K., Kodácsy J., Vaczó D., Kovács Zs. F.: *Machining of Ni-based Superalloys by Indexable End Mills*. Acta Materialia Transylvanica, 2/1. (2019) 49–54. <https://doi.org/10.33924/amt-2019-01-08>
- [3] Ulatan D., Ozel T.: *Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 51/3. (2011) 250–280. <https://doi.org/10.1016/J.IJMACH-TOOLS.2010.11.003>
- [4] Olufayo O. A., Boulaares D. M., Songmene V.: *Machining/machinability of Rene 65 superalloy for aerospace applications*. In: Proceedings of 2020 IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies, ICMIMT 2020. South Africa, 2020. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICMIMT49010.2020.9041189>
- [5] CNC Media, *Szuperötvözetek egykristályok – drágakövek a gázturbinákban*. (letöltve: 2023. 02. 07.) <https://www.cnc.hu/2014/01/szuperotvozet-egykrystalok-dragakovek-a-gaszturbinakban/>
- [6] Kodácsy J., Kovács Zs. F., Viharos Zs. J.: *A Ni-bázisú szuperötvözetek megmunkálhatósága horonymaráskor*. Gradus, 2/2. (2015) 142–146.
- [7] Kónya G., Kovács Zs. F., Kókai E.: *Milling of Nickel-based superalloy by trochoidal strategies*. In: 2022 IEEE 22nd International Symposium on Computational Intelligence and Informatics and 8th IEEE International Conference on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Science and Robotics (CINTI-MACRO), Magyarország, 2022. 1–6. <https://doi.org/10.1109/CINTI-MACRO57952.2022.10029453>
- [8] Sourmail T.: *Coatings for Turbine Blades*. 2003. <http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/EME715/AT%20PGMEC/Artigos%20para%20Semin%C3%A1rio/artigo%20cambridge%20coatings.pdf> (letöltve: 2023. február 3.)
- [9] Kodácsy J., Viharos Zs. J., Kovács Zs. F.: *A forgácsolhatóság meghatározásának módszerei Ni-bázisú szuperötvözetek horonymaráskor*. Gépgyártás, szaklap különszám, 15/2. (2015) 125–129.
- [10] Zhang B. Y., Zeng Y. N., Pang X., Li S. Q., Liu X., Deng W. J.: *Feasibility analysis and process characteristics of selective laser ablation assisted milling Inconel 718*. Advances in Manufacturing, 10. (2022) 495–519. <https://doi.org/10.1007/s40436-021-00384-9>
- [11] Sajjadi S. A., Nategh S., Guthrie R. I. L.: *Study of microstructure and mechanical properties of high performance Ni-base superalloy GTD-111*. Materials Science and Engineering, 325/1–2. (2022) 484–489. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01709-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01709-9)
- [12] Diniz A. E., Ferrer J. A. G.: *A comparison between silicon nitride-based ceramic and coated carbide tools in the face milling of irregular surfaces*. Journal of Materials Processing Technology, 206/1–3. (2008) 294–304. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.035>



A plazmanitridálási hőmérséklet hatása az 1.3207 gyorsacél tulajdonságaira

Effects of Plasma Nitriding Temperature on the Properties of 1.3207 Type High Speed Steel

Korsós Krisztián,¹ Kovács Dorina²

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Magyarország, Budapest, korsos.krisztian@edu.bme.hu

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Magyarország, Budapest, kovacs.dorina@gpk.bme.hu

Abstract

Active screen plasma nitriding on HS 10-4-3-10 high-speed steel specimens was performed at three different low nitriding temperatures while trying to keep the other nitriding parameters uniform. In addition, two extra samples were made to increase the treatment time. Optical microscopic investigation and microhardness testing were performed on the segments of the samples, and their qualitative composition was determined by energy-dispersive X-ray spectrometry. Based on the measurements, it is stated that the hardness of the surface can be increased 50% with active screen plasma nitriding.

Keywords: *active screen, plasma nitriding, high-speed steel.*

Összefoglalás

Kutatásunk során 1.3207 (HS10-4-3-10) gyorsacél próbatesten végeztünk aktív ernyős plazmanitridálást három különböző, kicsinek számító nitridálási hőmérsékleten, miközben a nitridálás további paramétereit egységesen tartottuk. Azt követően további két kezelést végeztünk eltérő nitridálási idő mellett. Az elkészült próbatestek keresztmetszetén mikroszerkezeti vizsgálatokat végeztünk, a felületi összetételüket energiadiszperzív röntgenspektrometriával határoztuk meg. Továbbá a keresztmetszeten és a felületeken vizsgáltuk a keménységet. Vizsgálataink eredményeként elmondható, hogy az aktív ernyős plazmanitridálás technológiájával jelentősen, akár 50%-kal is növelhető a kutatás során használt minta felületi keménysége.

Kulcsszavak: *aktív ernyő, plazmanitridálás, gyorsacél.*

1. Bevezetés

A 21. században egyre szigorúbbak az acélokkal szemben támasztott követelmények és komplexebbek az elvárások. Sokszor különböző mechanikai tulajdonságokat igényelnek az anyag felületén és keresztmetszetében. Ilyenkor megoldást jelenthet egy keresztmetszetben heterogén szövetszerkezet létrehozása, amire ma már két lehetőség is adott: megváltoztathatjuk a felület szövet-szerkezetét, vagy a felületi rétegben módosítjuk a kémiai összetételt. Az utóbb említett megoldáscsoportba tartozik az általunk választott termokémiai eljárás: a nitridálás [1, 2].

A nitridálás során adszorpció és diffúziós folyamatok segítségével nitrogént juttatunk az anyag felszínébe, ahol metalloidd fázisokat képezve létrehoz egy nagy keménységű kérget.

Az acélban a nitridálás milyenségét az eljárási paramétereken túl az acél karbon- és ötvözőtartalma befolyásolja. Az ötvözők hatása elsősorban – a vashoz hasonlóan – a nitrogénhez való affinitáson alapszik. A különböző nitridek képződéséhez szükséges szabadenergia alapján következtethetünk az egyes ötvözők stabilitására, és így módon megkülönböztethetünk erős, közepes és gyenge nitridképzőket.

Az ötvözőknek két jelentős hatása van a nitridálás során: diffúzió révén reakcióba lépnek a nitrogénnel, kemény nitrideket képezve növelik a felületi keménységet, továbbá lassítják a nitrogén diffúzióját, így csökkentve a kialakult kéreg mélységét. Ipari szempontból ugyanis nem a lehető legkeményebb felület a kívánatos, hanem a mély, mechanikailag ellenálló és leggazdaságosabban előállítható réteg kialakítása a cél [3].

Korábbi kutatásokban hagyományos plazmanitridálási eljárással már kezelték gyorsacélokat [4, 5]. Akbari és társai [6] megállapították, hogy 8 órás nitridálás mellett 140 mm-es diffúziós zóna keletkezett vegyületi réteg nélkül, amely elszórva tartalmaz Fe_3N - és Fe_4N -kiválásokat. Kutatásunk során az 1.3207 gyorsacél anyagminőségen végeztünk el különböző hőmérsékleteken aktív ernyős plazmanitridálást, hogy feltárjuk, a keménységében és kopásállóságában kiváló gyorsacélnek növelhetők-e ezek a tulajdonságai, tekintettel a gyorsacélok jellemzően nagy ötvözet tartalmára.

2. Kísérleti módszertan

A következő fejezetben a választott anyag, technológia és vizsgálati módszerek ismertetésére kerül sor.

2.1. Alapanyag

A választott acél a kereskedelmi forgalomban kapható gyorsacélok között kiemelkedő keménységű és kopásállóságú, valamint rossz megmunkálhatósággal rendelkezik. Az acél alkalmazása szempontjából kiváló eszterga- és marószerszám nagyoló és befejező munkákhoz, famegmunkáló szerszámokhoz, nagy igénybevételű hidegmunkáló szerszámokhoz és szerszámbetétekhez.

A kiválasztott anyag ötvözői nitridképzők, és ernyőségük is nagy az acélban, így a kezelés eredményeként kimagasló felületi keménységre, ugyanakkor vékony rétegvastagságra számíthatunk [7]. A kutatáshoz használt anyagminőség névlegesen az ISO 4957 szabvány alapján a következő ötvözőket tartalmazza: 1,2–1,35% C, $\leq 0,4\%$ Mn, $\leq 0,45\%$ Si, $\leq 0,03\%$ S, 3,8–4,5% Cr, 3,2–3,9% Mo, 3,0–3,5% V, 9,0–10,0% W, 9,5–10,5% Co, valamint Fe.

A kereskedelmi forgalomban HSS CO10 néven is kapható, 1.3207 (HS10-4-3-10) acélból $12 \times 3 \times 160$ mm-es hasáb formájában, majd utólagos megmunkálással állítottuk elő a vizsgálatokhoz használt próbatesteket.

2.2. Az aktív ernyős plazmanitridálás

A felületkezelési eljárás során 100 mm átmérőjű és 8 mm lyukátmérőjű, ötvözetlen acél anyagú

1. táblázat. A vizsgálatokhoz előállított minták nitridálási paraméterei

Minta jele	Hőmérséklet (°C)	Idő (h)
1	360	5
2	440	5
3	520	5
4	360	8
5	520	8

aktív ernyőt használtunk. Az ernyő anyagának és próbatesttől való távolságának hatását elhanyagoltuk, tekintettel arra, hogy mind az 5 próbatestre egységesen hatnak ezek a paraméterek.

Egységes szinten tartottuk a feszültséget és 75N2-25H2 gázkeverék nyomását. Mivel a próbatestekre kitűzött hőmérséklet megtartása az elsődleges cél, így a teljes kezelési idő alatt esetenként szükséges volt kissé eltérnünk az egységes nyomástól vagy feszültségtől. A kezelési paramétereket és előállított mintákat az 1. táblázat tartalmazza.

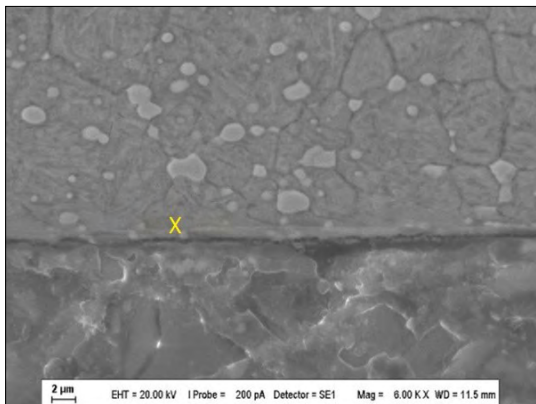
2.3. Vizsgálati módszerek

A próbatestekből a felületkezelést követően keresztmetszeti csiszolatokat állítottunk több lépésben SiC-tartalmú papíron csiszolással, majd 3 és 1 μ m gyémántszuszpenzióval történő polírozással. Az elkészült csiszolatokat Beraha II típusú marószerszettel [8] martuk.

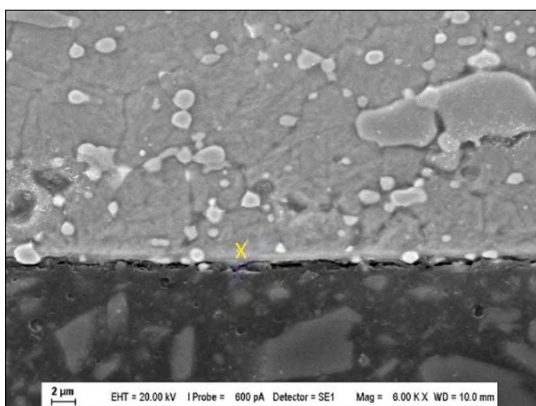
Pásztázó elektronmikroszkóppal (típusa: Zeiss Evo Ma 10) vizsgáltuk a kialakult felületi réteget, illetve energiadiszperzív röntgenspektrométerrel mértük meg a minták felületi nitrogéntartalmát, így bizonyítva a felületkezelések sikerességét, és megállapítva az eltérő kezelési hőmérsékletek hatásosságát. Végül 200 gramm terheléssel mértük a keménységet, felvéve a próbatestek keménységprofilját és a felületi keménységét, melyhez BUEHLER® IndentaMet™ 1100 típusú mikrokeménység-mérőt használtunk.

3. Vizsgálati eredmények

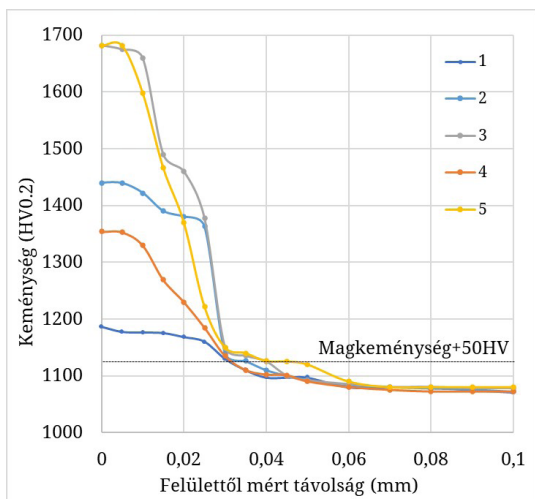
A pásztázó elektronmikroszkóppal végzett vizsgálatok szerint a gyorsacél minták felületén a teljes kezelési hőmérséklet-tartományon és kezelési idők alatt nem alakult ki vegyületi réteg, amely az 1. és 2. ábrán is megfigyelhető. Az energiadiszperzív röntgenspektrométerrel készített felületi-összetétel-vizsgálat megbízhatóan mérte a nitrogéntartalmat valamennyi mintán (2. táblázat). A mérést a keresztmetszeti csiszolatok mentén, a 2. ábrán sárgával jelölt részen végeztük el.



1. ábra. Az 520°C-on, 5 óráig kezelt minta metszete (sárga kereszt jelöli az anyagösszetétel meghatározásának helyét)



2. ábra. Az 520°C-on, 8 óráig kezelt minta metszete (sárga kereszt jelöli az anyagösszetétel meghatározásának helyét)



3. ábra. A minták keménységprofilja

2. táblázat. Keresztmetszeti csiszolaton mért összetétel a felszín alatti részen (tömegarányos, %)

No.	N	V	Mo	W	Co
1	3,03	1,25	1,93	5,15	9,57
2	4,56	1,09	2,3	4,21	9,91
3	6,18	5,75	4,35	11,7	9,79
4	6,99	2,73	3,90	8,56	8,55
5	13,0	2,46	4,33	9,45	9,52

3. táblázat. A diffúziós zóna rétegvastagsága

Minta jele	Rétegvastagság (μm)
1	31
2	36
3	40
4	33
5	45

Megállapítható tehát, hogy ugyan vegyületi réteg a mintákon nem keletkezett, diffúziós réteg viszont létrejött, amelynek nitrogéntartalma a kezelési hőmérséklet vagy kezelési idő növelésével növekszik.

Ez a jelenség a nagyobb hőmérsékleten gyorsabban zajló diffúzióknak vagy a jelenség zajlására rendelkezésre álló időnek tudható be [9].

A keménységmérés eredménye a 3. ábrán látható.

Jól látható, hogy a maximális keménységek növekedtek a hőmérséklet növelésével. A felvett görbék segítségével ISO 18203:2016 szabvány alapján meghatározásra kerültek a kialakult diffúziós rétegvastagságok, melyeket a magkeménység +50HV keménységet elérő pontnál vettük fel [10]. Az ezekből leolvasott értékeket a 3. táblázat tartalmazza.

4. Következtetések

A gyorsacélok aktív ernyős plazmanitridálása során már kis hőmérsékleten is növelhető a felületi keménység, míg nagyobb alkalmazott hőmérséklet esetén a keménységnövekedés értéke jelentősen növekszik. Az idő növelésével nagyobb hőmérsékleten nem, kisebbben viszont eredményesen növelhető a felületi keménység.

A gyorsacélok nitridálásakor a hőmérséklet növelésével a diffúziós zóna rétegvastagsága minimálisan növelhető, de vegyületi réteg nem ala-

kult ki. A kezelési idő növelésével jelentősebben növelhető a kialakult diffúziós rétegvastagsága.

A gyorsacélok nagyfokú ötvözöttsége miatt vegyületi réteg nem alakítható ki aktív ernyős plazmanitridálással, 5–8 óra eljárási időtartam alatt, míg a diffúziós zóna már a legkisebb vizsgálati hőmérsékleten is létrejött.

Köszönetnyilvánítás

Ezt a munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatta az OTKA PD_22 142307 támogatási szerződés keretében.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Szabó A., Szlancsik A.: *Titán alapú aktív ernyős plazmanitridálás*. In: XXVIII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT 2020. Kolozsvár, Románia, 354. 2020. 85–88.
- [2] Naeem M., Qadeer M., Mujahid Z., Rehman N. U., Díaz-Guillén J. C., Sousa R. R. M., Shafiq M.: *Time-resolved plasma diagnostics of cathodic cage plasma nitriding system with variable pulsed duty cycle and surface modification of plain carbon steel*. Surface and Coatings Technology, 464. (2023)
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129542>.
- [3] Thelning K.: *Steel and its Heat Treatment*. Butterworths, 1984. 492–544.
- [4] Tier M., Bloyce A., Bell T., Strohaecker T.: *Wear of plasma nitrided high speed steel*, Surface Engineering, 14/3. (1998) 223–228.
<https://doi.org/10.1179/sur.1998.14.3.223>
- [5] Kwietniewski C., Fontana W., Moraes C., Rocha A.da S., Hirsch T., Reguly A.: *Nitrided layer embrittlement due to edge effect on duplex treated AISI M2 high-speed steel*. Surface and Coatings Technology, 179/1. (2004) 27–32.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00795-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00795-3).
- [6] Akbari A., Mohammadzadeh R., Templier C., Riviere J.P.: *Effect of the initial microstructure on the plasma nitriding behavior of AISI M2 high speed steel*. Surface and Coatings Technology, 204/24. (2010) 4114–4120.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.05.042>
- [7] Davis J. R.: *Machining* ASM International, Ohio, ASM Handbook, 16. (1989) 51–59.
- [8] Renkó J. B., Szabó P. J.: *Investigation of the Effect of Over-Etching During Color Etching*. Acta Materialia Transylvanica, 5/1. (2022) 29–34.
<https://doi.org/10.33924/amt-2022-01-07>
- [9] *Liquid nitriding of steels*. In: ASM Handbook 4A.: *Steel Heat Treating. Fundamentals and Processes*. (Szerk.: Dossett J. L., Totten G. E.), ASM International, Ohio, (1991) 680–689.
- [10] ISO 18203:2016: *Steel – Determination of the thickness of surface-hardened layers*



A fémfröccsöntés paramétereinek hatása a gyártott alkatrészekre

Effects of injection Moulding Parameters on the Produced Parts

Ledniczky György,¹ Weltsch Zoltán²

¹ Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország, ledniczky.gyorgy@gamf.uni-neumann.hu

² Széchenyi István Egyetem, Anyagtudományi és Technológiai Tanszék; Járműipari Kutatóközpont. Győr, Magyarország, weltsch.zoltan@sze.hu

Abstract

The publication deals with an innovative technology called powder-based metal injection moulding, which is a combination of traditional polymer injection moulding and powder metallurgy. With the technology, it is possible to produce metal components with complex geometry in large series. There is an extremely large selection of materials that can be used, mostly steel, copper, titanium or nickel-based alloys. In this research, the material used is type 17-4PH, martensitic corrosion-resistant steel, and since it is a widely used material, it is examined in many international articles and research studies, and it is also common in industry, so it is advisable to use this type of material for further comparability. Little information can be found in the literature about spraying parameters and their effects, which is why this research focusses on this. On the other hand, these data can also serve as useful information for the industry. During the production of so-called green products, the effects of product shrinkage were measured by changing the most important parameters and comparing the effects of these parameters to traditional polymer injection moulding.

Keywords: *metal injection moulding, shrinkage, stainless steel.*

Összefoglalás

A cikk egy innovatív gyártási eljárással foglalkozik, amit poralapú fémfröccsöntésnek hívnak, amely a hagyományos műanyagfröccsöntés és a porkohászat kombinációja. Ezzel az eljárással komplex geometriájú fém alkatrészek előállítása lehetséges nagy sorozatban. A felhasználható anyagok tekintetében rendkívül nagy a választék, leginkább acél-, réz-, titán- vagy nikkelalapú ötvözetek használhatóak. Jelen kutatás során a felhasznált anyag 17-4PH típusú, martenzites korrózióálló acél, mivel ez széles körben elterjedt alapanyag, sok kutatásban ezt vizsgálják, valamint az iparban is elterjedt; ezért célszerű a további összehasonlíthatóság érdekében ilyen típusú anyagot használni. A szakirodalomban kevés információt lehet találni a fröccsöntési paramétereiről és azok hatásairól, ezért a kutatásunk erre fókuszál, másrészt ezek az adatok az ipar számára is hasznos információként szolgálhatnak. Az ún. zöldtermék előállítása során, a fontosabb paraméterek változtatásával mértük a termék zsugorodását, és e paraméterek hatásait hasonlítjuk össze a hagyományos műanyagfröccsöntéssel.

Kulcsszavak: *fémfröccsöntés, zsugorodás, rozsdamentes acél.*

1. Bevezetés

Az iparban egy egyre szélesebb körben alkalmazott eljárás a fémfröccsöntés (MIM), amivel komplex geometriájú fémalkatrészeket nagy pontos-

sággal és nagy darabszámban lehet előállítani. Az említett eljárásnak az egyik nagyobb felhasználási területe az autóipar, ahol viszonylag kisméretű termékek gyártására alkalmazzák. A felhasznál-

ható anyagokat tekintve rendkívül nagy a választék, de leginkább vasalapú ötvözetekről, titán- és rézötvözetekről beszélhetünk. A szakirodalmi áttekintések során nagyon kevés információ található a fröccsöntési paramétereknek a termék tulajdonságaira gyakorolt hatásáról, így a kutatás első lépése annak a vizsgálata, hogy a fröccsöntési paraméterek milyen hatást gyakorolnak a termék zsugorodására, illetve hogy ez mennyire hasonlít a műanyagok fröccsöntésénél tapasztaltakra [1].

1.1. A fémfröccsöntés

A fémfröccsöntés a legegyszerűbben megfogalmazva a hagyományos fröccsöntés és a porhászat házasítása, ahol alapanyagként egy nagy fémportartalmú (95% tömegarány) és 5% műanyagalapú kötőanyagot tartalmazó granulátumot használnak, amit a fröccsöntőgéppel egy szerszámba injektálunk. Az ezután létrejövő termék az ún. zöldtermék. Az így előállított termékben a kötőanyag mennyiségét csökkenteni szükséges: létre kell hozni egy nyitott pórusos szerkezetet, ami a termék teljes keresztmetszétére igaz. A kötőanyag-eltávolításnak többféle módja létezik, attól függően, hogy milyen kötőanyagrendszerrel beszélünk [2]. Fontos, hogy a kötőanyag úgy kell működnie, hogy porózus legyen a termék, viszont azért legyen benne még annyi kötőanyag, hogy összetartsa a porrészecskéket. A kötőanyagban csökkentett terméket barnaterméknek nevezzük. A következő technológiai lépés a szinterelési fázis. A terméket nagy hőmérsékletű kemencében, olvadásponti hőmérséklet alatt izzítjuk mindaddig, amíg a sűrűsége eléri az anyagra jellemző sűrűségét. Az alkatrész ekkor nyeri el fémes tulajdonságát és csengését is [1]. A folyamat áttekinthető az 1. ábrán.



1. ábra. A fémfröccsöntés folyamatábrája [3]

Látható, hogy MIM-eljárás egy szűk tartományát vizsgálom, nevezetesen a fröccsöntési fázist.

1.2. A paraméterek hatása a zsugorodásra

A fröccsöntési paraméterek megváltoztatásával lehetséges a fröccsöntött termék méreteinek változtatása, ami közvetlen kapcsolatban áll a zsugorodással. Az ömledék-hőmérséklet, a szerszám-hőmérséklet, az utánnnyomás a főbb befolyásoló tényezők közé tartozik. A MIM esetén nem feltétlenül ugyanazokat a folyamatokat figyelhetjük meg, mint a műanyagok fröccsöntésénél, mivel a feldolgozott granulátum csak kevés százalékban tartalmaz polimer anyagokat, és ráadásul a kétlépcsős kötőanyag-eltávolítás miatt háromkomponensű.

A szerszám és az ömledék-hőmérséklet emelése általában növeli a zsugor értékét.

Az utánnnyomás növekedésével a zsugorodásra csökkenő hatást érünk el [4, 5].

2. A kísérlet módszertana

A fejezetben a fröccsöntési paraméterek mérésére használt eszközöket, a felhasznált alapanyagokat, a szerszámot és a kísérlet paramétereit ismertetjük.

2.1. A kísérletben használt alapanyagok

A választott alapanyag martenzites korrózióálló acél, kereskedelmi megnevezése: 17-4PH, főbb komponensei az 1. táblázatban láthatók [6]. Azért célszerű ezt az anyagot használni, mivel mások is ezt a típusú anyagot használják mind a MIM-hez, mind pedig az additív gyártáshoz [7]. Azon kívül, hogy korrózióálló, nagyon jók a mechanikai tulajdonságai, ezért az ipari felhasználása is széles körű. Gyakran használják a repülőgép- és az űrtechnikában, valamint az olaj- és gáziparban. Felhasználják csavarok, rugók, szegek és fogaskerekek gyártására, az orvosi eszközök körében pedig sebészeti szerszámok készítésére.

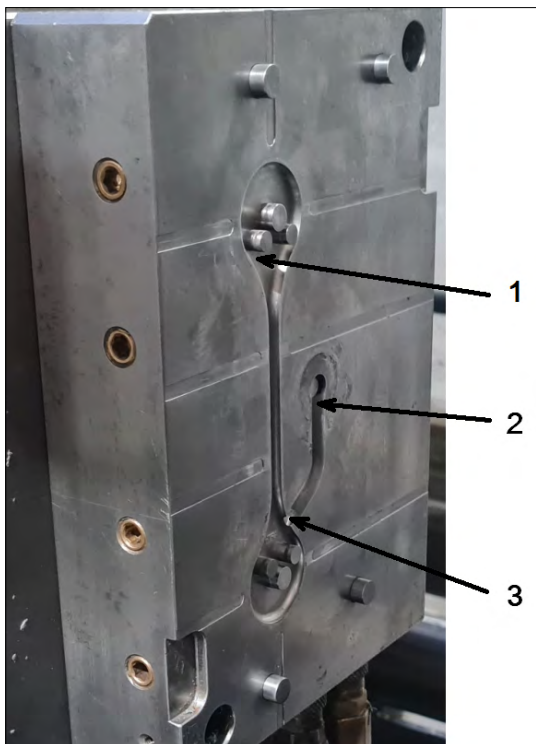
A felhasznált kötőanyag két fő komponense polipropilén és viasz, amely 6 tömeg százalékban van a fémporral elkeverve [8].

1. táblázat. A 17-4 PH korrózióálló acél főbb komponensei 1.4542 [7]

%	Cr	Mn	Si	Ni	Cu
Min.	15,0	–	–	3,50	3,00
Max.	17,5	1,00	0,70	5,00	5,00

2.2. Próbatestkészítő szerszám

A tesztek elvégzésére egy próbatestet – amely egy körülbelül egy 36 g-os alkatrész, többféle teszt elvégzésére alkalmas – előállító szerszámot használtunk. A szerszámnak oldalanként 1-1 hűtőköre van, a központi beömlőből egy viszonylag rövid csatornán keresztül egy él beömlő táplálja a formaüreget. A 2. ábrán látható a kísérletre használt szerszám.



2. ábra. A kísérlethez használt szerszám
1 – Formaüreg, 2 – Csatorna, 3 – Gát



3. ábra. Kitöltési sorozat az átkapcsolási pont meghatározásához

2.3. Technológiai paraméterek

A fröccsöntési paraméterek pontos meghatározásához előfröccsöntéseket végeztünk. Ahhoz, hogy a paraméterek hatásait tudjuk vizsgálni, szükséges a feldolgozási határokon belül egy optimálisnak vélt technológiai beállítás. Az átkapcsolási pont 99%-os formakitöltésre (3. ábra) volt állítva, úgy, hogy folyamatosan emelkedett az adagolási mennyiség.

A masszahőmérsékletet a kötőanyag PE-komponense feldolgozási hőmérsékletének a középértékére választottuk, az utánnomás értékét a két szélső feldolgozási határ középre. Az optimális szerszámhőmérsékletet tapasztalati úton határoztuk meg.

2. táblázat. A meghatározott feldolgozási paraméterek

Paraméter	Érték
Befröccsöntési térfogat	6,56 cm ³ /s
Befröccsöntési nyomás	903 bar
Utónyomási idő	2 s
Utónyomás	827 bar
Hűlésidő	15 s
Szerszámhőmérséklet	45°
Ömledék-hőmérséklet	205 °C

2.4. Változtatott paraméterek

A kísérlettervezés során az elsődleges cél a főbb paraméterek, a masszahőmérséklet, a szerszámhőmérséklet és az utánnomás értékének változtatása, minden esetben külön-külön. A kísérlettervezés során ezért 16 különféle technológiai beállítás született. Az első 5 lövést nem vettük figyelembe, megvárva, hogy a folyamat stabilá váljon, beálljon a hőegyensúly. Ezt követően beállításokként 10 db próbatestet készítettünk, amelyből 5 db-ot zöldtermékként hagytunk, a másik 5 db viszont további lépések (kötőanyag-eltávolítás, szinterezés) tárgyát képezte.

3. táblázat. A változtatott paraméterek és értékeik

Változó	Utánnomás	Szerszám hőmérséklete	Ömledék hőmérséklete
Eltérés –	550 bar	25 °C	195 °C
Eltérés –	690 bar	35 °C	200 °C
Középérték	827 bar	45 °C	205 °C
Eltérés +	965 bar	55 °C	210 °C
Eltérés +	1103 bar	65 °C	215 °C
Eltérés +	1241 bar	75 °C	220 °C

3. Eredmények

A kísérlet során, miután elkészültek a próbafröccsöntések, elvégeztük az eredmények kiértékelését. Az első körben a még nem szinterezett és nem eltávolított kötőanyagú termékeket vizsgáltuk. Azonban a fröccsöntési paraméterek változtatása miatt a termékek a zárósík mentén sorjásodást (4. ábra) mutattak, ami befolyásolta volna a furatok távolságának mérését. Ezért az összes elkészített minta furatát dörzsárral megmunkáltuk, hogy pontosabb mérési eredményeket lehessen elérni. Ennek eredményeként a furatok távolsága pontosan megmérhető volt.

A sorja eltávolítása után a mintákon a furatok távolságát (5. ábra) optikai mérőgéppel mértük, tehát a lineáris zsugorodás értéke is erre a távolságra vonatkozik.

Az így kapott eredményeket egy diagramban a változó tulajdonság és a zsugorodás függvényében ábrázoltuk. Az adatokat az új anyagból 5 lövés után vett minták átlaga adja.

A zsugorodás meghatározása a következő összefüggéssel történt:

$$\text{Zsugorodás} = \left(\frac{\text{szerszám méret}}{\text{termék méret}} - 1 \right) \cdot 100$$

A termék méretét leginkább befolyásoló paraméter a szerszámhőmérséklet (6. ábra). A zsugorodás itt 0,34%-tól 0,72%-ig terjedt, ami már jelentős eltérésnek tekinthető, ami egy nagyságrendileg 100 mm-es vizsgálati hosszon 0,4 mm méret eltérés.

A görbe emelkedő tendenciát mutat, hasonlóan a polimerek fröccsöntéséhez, viszont csak 55 °C hőmérsékletig. E hőmérséklet felett ismét csökkenni kezd a zsugorodás értéke. A próba közben a nagyobb szerszámhőmérsékletek esetén megfigyelhető volt, hogy a termékek „nedvesen” jönnek ki a szerszámból. Itt feltételezhetően a kötőanyagból viasz kiválás (7. ábra) törtéhet. Ezért a kiváló viasz helyére is fémrészcskék kerülhetnek, amelyeknek kisebb a zsugor faktora. Ez feltételezhetően mérhető lenne a komponensek százalékos arányából.

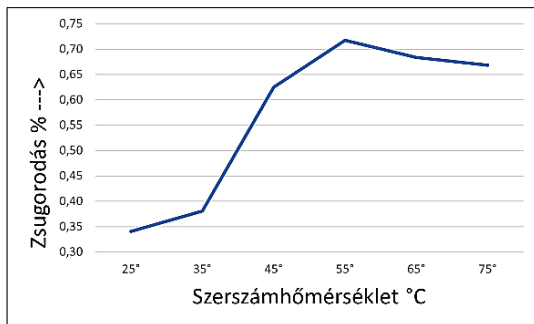
Az utánnyomás-értékek megváltoztatása a polimerekhez képest más jellegű összefüggést mutat. Az eredmények alapján a zsugorodásnak van egy maximuma 900 bar környékén (8. ábra), ami kisebb vagy nagyobb nyomásértékek esetén is kisebb zsugorodással jár. Külön kiemelendő, hogy jelentősen kisebb hatása van az utánnyomásnak a zsugorodásra, mint a szerszámhőmérsékletnek. A műanyagok feldolgozásához képest az eltérés



4. ábra. A próbatest furatának sorjásodása



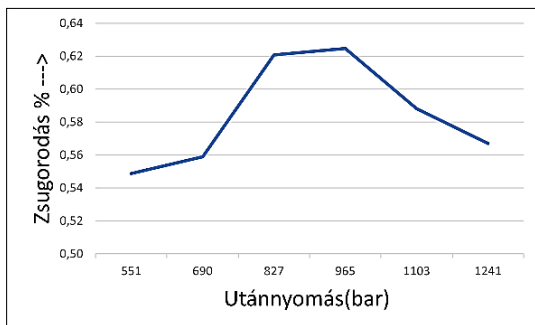
5. ábra. A lineáris zsugorodás mért értéke



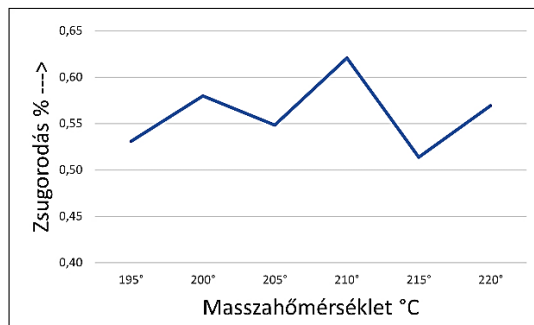
6. ábra. A szerszámhőmérséklet hatása a zsugorra



7. ábra. Nedves termékfelület viaszkiválás miatt



8. ábra. Az utánnnyomás hatása a zsugorra



9. ábra. A massa hőmérsékletének hatása a zsugorodásra

okai több dologgal is magyarázhatóak, viszont ez még további kutatást igényel.

A massa hőmérsékletének változtatása volt legkevésbé hatással a termék méreteire, illetve a görbe szórása az eltérésekhez képest jelentős (9. ábra).

4. Következtetések

Az elvégzett vizsgálatok eredményei alapján összegzőként elmondható, hogy a polimerfröccsöntésre vonatkozó általános törvényszerűségek nem feltétlenül alkalmazhatóak a fémpor feldolgozására. Az alapanyagok fizikai tulajdonságai jelentős különbségeket mutatnak, például eltérő sűrűség, viszkozitás, hővezetési tényező, valamint egy háromkomponensű rendszer viselkedését kell vizsgálni.

Azonban az előzetes mérési eredmények sem elegendőek ahhoz, hogy egyértelmű következtetéseket vonjunk le. További tesztek és vizsgálatok szükségesek a kapott eredmények érvényességének és megbízhatóságának igazolásához. Ezért további vizsgálatok elvégzése szükséges annak érdekében, hogy a fröccsöntési folyamat optimalizálása és a végtermék minőségének javítása érdekében hatékonyabb módszereket alkalmazhassunk.

A tesztek alapján feltételezhető, hogy más tényezőknek is van hatásuk a zsugorodásra a nyomás és szerszámhőmérséklet esetében.

A legerőteljesebb hatása a szerszámhőmérséklet megváltoztatásának van.

A masszahőmérséklet hatása nem ismert, előfordulhat mérési hiba, ami további méréseket igényel.

Köszönetnyilvánítás

Az alapanyagok és a technológia biztosításában nyújtott segítséget köszönjük az AFT-Hungary Kft.-nek.

A kutatás az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Heaney D. F.: *Handbook of Metal Injection Molding*. 2. kiadás Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, Cambridge, (2019) 1–25.
- [2] Petzoldt F., Eifert H., Hartwig T., Kramer L., Velt G., Pest A.: *Broadening the Scope of MIM*. Materials and Manufacturing Processes, 12/4. (1997) 691–711.
<https://doi.org/10.1080/10426919708935176>
- [3] Custom Part USA, *Metal Injection Molding* <https://www.custompartnet.com/wu/metal-injection-molding> (letöltve: 2023. 03. 01.).
- [4] Barriere Th., Liu B., Gelin J. C.: *Determination of the optimal process parameters in metal injection molding from experiments and numerical modeling*. Journal of Materials Processing Technology, 143–144. (2003) 636–644.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00473-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00473-4).
- [5] Tseng W. J.: *Statistical analysis of process parameters influencing dimensional control in ceramic injection molding*. Journal of Materials Processing Technology 79/1–3. (1998) 242–250.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00019-3)
- [6] Amatek Specialty Metal Products. *Specialty Powders 17.4 PH Alloy Powder* <https://www.powderclad.com/products/specialty-powders/17-4-ph-alloy-powder>
- [7] Singh G., Missiaen J.-M., Bouvard D., Chaix J.-M.: *Additive manufacturing of 17-4 PH steel using metal injection molding feedstock: Analysis of 3D extrusion printing, debinding and sintering*. Additive Manufacturing, 47. (2021) 102287.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102287>.
- [8] Hamidi M. F. F. A., Harun W. S. W., Khalil N. Z., Ghani S. A. C., Azir M. Z.: *Study of solvent debinding parameters for metal injection moulded 316L stainless steel*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 257. (2017) 012035.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/257/1/012035>.



Acélcsőbe töltött alumíniummátrixú szintaktikus fémhabok egy lépéses gyártása

Fabrication of In-situ Syntactic Aluminium Foam-Filled Steel Tubes

Pados Gábor,^{1,2,a*} Kemény Alexandra,^{1,2,b} Szovák Benedek,^{1,2,c} Károly Dóra,^{1,2,d}
Orbulov Imre Norbert^{1,2,e}

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország.

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

^{a*} padosgabor@edu.bme.hu, ^b kemeny.alexandra@gpk.bme.hu, ^c szovak.benedek@edu.bme.hu,

^d karoly.dora@gpk.bme.hu, ^e orbulov.imre.norbert@gpk.bme.hu

Abstract

In all areas of industry, when choosing a material, compromises must be made since there is no material with all the properties that are preferential for any use. In the automotive sector, lighter and less dense materials can provide a considerable advantage, for example, lower fuel consumption due to weight reduction. Specialists dealing with materials science within metal foams have been trying to exploit the low density, high specific strength and high energy absorption capacity of metal foams in as many ways as possible for a long time. This research describes the one-step production method of syntactic metal foams with an aluminum matrix infiltrated into a thin-walled steel tube, intended to create functional structures with a strong adhesive bond and metal foam filling in a feasible way.

Keywords: *metal matrix syntactic foam, foam-filled tubes, low-pressure infiltration.*

Összefoglalás

Az ipar minden területén, amikor anyagválasztásra kerül sor, kompromisszumokat kell kötni, hiszen nincsen olyan anyag, amelynek minden tulajdonsága kedvező lenne bármely felhasználásra. A járműiparban a könnyebb és kisebb sűrűségű anyagok nagy előnyt jelentenek, például a tömegcsökkenés következtében elérhető kevesebb üzemanyag-fogyasztás miatt. Az anyagtudománnyal, azon belül is a fémhabokkal foglalkozó szakemberek régóta igyekeznek a fémhabok kis sűrűségét, nagy fajlagos szilárdságát és nagy energiaelnyelő képességét a lehető legtöbb módon kiaknázni. Ebben a kutatásban vékony falú acélcsőbe infiltrált, alumíniummátrixú, szintaktikus fémhabok egy lépéses gyártási módszerét ismertetjük, amely erős adhéziós kötésű, fémhab töltetű funkcionális szerkezetek létrehozására hivatott, kivitelezhető módon.

Kulcsszavak: *fém mátrixú szintaktikus hab, habbal kitöltött csövek, kisnyomásos infiltrálás.*

1. Bevezetés

A szintaktikus fémhabokat legtöbbször önmagukban állítják elő, és nem funkcionális szerkezeti elemekként [1–3]. A közelmúltban viszont egyre több kutatás foglalkozik a fémhabbal kitöltött csövekkel, amelyek valamilyen falvastagságú csövekbe helyezett fémhabokat tárgyalnak. Ugyanis

a fémhabok tulajdonságait tovább növelhetjük, ha adott (fém) anyagú, tömör vagy üreges zárt-szelvényekbe töltjük őket, és a fémhab töltet és az azt körülvevő zárt-szelvény egymást támasztják meg [4].

A fémhabbal kitöltött csövek jobban ellenállnak a különböző típusú terheléseknek, mint a fémha-

bok magukban. A két legfontosabb igénybevétel ilyen szerkezeteknél a nyomás és a hajlítás, ezért a kutatók főként ezekkel a tulajdonságokkal jellemzik a habbal töltött csöveket. Ezeknek a szerkezeteknek az előállítása kétféle módon történhet: egy lépésben vagy több lépésben. Egylépéses előállítás során a hab gyártási folyamata már eleve a zártszelvényben történik, míg a többlépéses gyártásnál a fémhabot előállítás után megfelelő méretűre megmunkálják, majd csőbe helyezik vagy valamilyen módon rögzítik.

Linul és társai [5, 6] különböző hőmérsékletek hatását vizsgálták csőbe helyezett fémhabok axiális, kvázistatikus zömítésére. Az A356 (AlSi7Mg) zárt cellás habokat bekeveréses öntéssel állították elő és $\text{Ø}20 \times 20$ mm-es darabokra vágták. A $0,38\text{--}0,46$ g/cm³ sűrűségű habmintákat $\text{Ø}22 \times 20$ mm külső méretű, 1 mm falvastagságú, hengeres X5CrNi18-10 rozsdamentes acélcsövekbe helyezték, ragasztóanyag nélkül. A kvázistatikus zömítővizsgálatokat 10 mm/min keresztfejsébséggel végezték szobahőmérsékleten és emelt hőmérsékleteken (150 °C, 300 °C és 450 °C). Az összeszenyomott mintákat pásztázó elektronmikroszkóppal és optikai mikroszkópos módszerekkel vizsgálták. A hőmérséklet növelésével az alumíniumhab rideg viselkedése képlékennyé változott, 150 °C felett pedig az üres csövek és a habbal töltött csövek közötti csúcspontkülönbség csökkenni kezdett az alumínium habtöltet lágyulása miatt. Azt is megfigyelték, hogy az acélcsőben lévő hab csökkentette a mikrorepedések méretét és eloszlását.

Csak kevés, egy lépésben gyártott fémhabbal kitöltött zártszelvényről szóló tudományos cikk érhető el a szakirodalomban, ezeket foglaljuk össze alább.

Duarte és társai [7] porösszenyomásos habosítási technikával zárt cellás AlSi7 habokat gyártottak tömör alumíniumhéjjal úgy, hogy a habosítható prekurzort AlMgSi0,5 csőbe helyezték, és ott tartották 700 °C-on 12 percig. A gyártási módszer a hab szoros illeszkedését, de a szilárdság és az energiaelnyelés csökkenését eredményezte kvázistatikus és dinamikus axiális összenyomás hatására.

Kemény és társai [8] az egy lépésben létrehozott mintákat kisnyomású infiltrálással gyártották le, ahol az olvadt mátrixanyagot (AlSi12) közvetlenül az AlMgSi0,5 anyagú, duzzasztott agyagkavicsal megtöltött csőbe öntötték. A mátrix és a cső anyagának kis olvadáspontbeli különbsége az infiltrálási paraméterek pontos beállítását követelte meg. Az előállított minták külső átmérője $\text{Ø}50$ mm

és belső átmérője $\text{Ø}40$ mm volt. Az alkalmazott gyártási eljárás sokban hasonlít a jelen kutatásban alkalmazotthoz, viszont fontos különbség az egylépéses gyártás során alkalmazott cső anyaga és falvastagsága, illetve az alkalmazott berendezésben is különbség lehet fel.

Chilla [9] és kutatócsoportja zárt cellás alumíniumhabbal töltött, X2CrNiMo17-12-2 rozsdamentes acél csöveket vizsgált, amelyek befoglaló méretei $\text{Ø}31,7 \times 100$ mm, falvastagsága pedig 1,85 mm volt. Háromféle próbatestet gyártottak, az első típusnál a töltékül szolgáló fémhabot szoros illesztéssel helyezték bele az acélcsőbe, a második típusú próbatestekben az alumínium prekurzort még habosítás előtt helyezték a csőbe, és ott habosították azzal a céllal, hogy adhézió alakuljon ki a habanyag és a cső anyaga között. A harmadik típusú próbatestekben az acélcsövek belső felületét rézzel galvanizálták a csőben történő habosítás előtt, hogy a rézréteg elősegítse a hab és a cső közötti erős kötés kialakulását. Ez sikeres eljárásnak bizonyult, hiszen az alumínium habosítása után az összefüggő rézbevonat eltűnt, és egy reakciótermék keletkezett a hab és a cső határfelületén, amely alumíniumot, rezet, ónt és vasat is tartalmazott.

Taherishargh és társai [10] egy lépésben csőbe töltött szintaktikus fémhabokat állítottak elő infiltrációs módszerrel vákuum segítségével AlSi7Mg mátrixból és 2–2,8 mm méretű expandált perlitsemcsékből. Az infiltrálás X5CrNi18-10 rozsdamentes acélcsövek belsejében történt, amelyek $\text{Ø}25,4$ külső átmérőjű és 0,9 mm, illetve 1,2 mm falvastagságúak voltak. A próbatesteket számítógépes tomográfiával és energiadiszperziós röntgen spektrométerrel (EDS) vizsgálták, illetve kvázistatikus axiális zömítésnek és hárompontos hajlításnak tették ki, előbbi 3 mm/min keresztfejsébséggel, utóbbit pedig 0,1 mm/s és 284 mm/s keresztfejsébséggel 30 mm elmozdulásig vizsgálták. A 0,9 mm-es falú próbatestek általános tulajdonságai jobbak voltak, és az EDS megerősítette a mátrix és a cső közötti kapcsolatot. A szakítószilárdságot a hajlítási tulajdonságok alapján becsülték.

Movahedi és kutatócsoportja [11] $\text{Ø}28 \times 30$ mm-es, szintaktikus fémhabbal körülvett, kör keresztmetszetű zártszelvényeket gyártott egy lépésben ellengravitációs infiltrációval Zn27Al2Cu0,015Mg ötvözetből, 2–2,8 mm-es expandált perlitsemcsékből és AlMgSi0,5 anyagú csövek felhasználásával. Az $\text{Ø}12 \times 36$ mm-es, 1,6 mm falvastagságú csövet a forma közepébe helyezték infiltrálás előtt, amely expandált perlitsemcsékkel volt

körülvéve. A pásztázó elektronmikroszkópi képek szoros illeszkedést mutattak a cső és a mátrixanyag között, de az EDS-analízis nem mutatott kémiai reakciót a határfelületen.

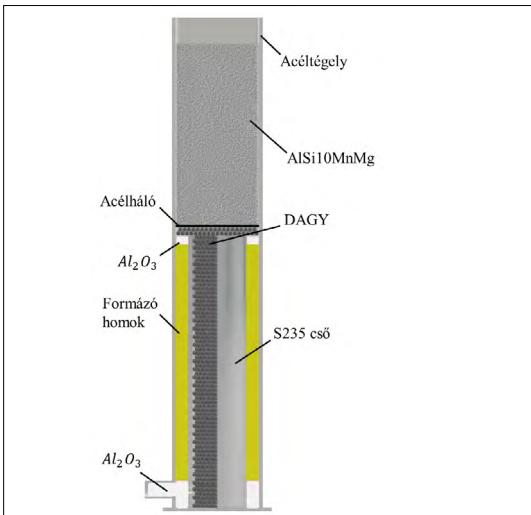
2. Felhasznált anyagok

A kutatás során alumíniummátrixú (AlSi10MnMg – Silafont-36) szintaktikus fémhabokat gyártottunk lágyacél (S235) csövekbe, amelyek falvastagsága 1 mm, külső átmérője pedig $\varnothing 30$ mm volt.

A szintaktikus fémhab töltőanyagaként a Liapor GmbH & Co. KG által forgalmazott duzzasztott agyagkavics (DAGY) részecskéket alkalmaztunk.

3. Egylépéses előállítás

A gyártási folyamat előre legyártott, acélból készült téglék segítségével történt, amelyek 40×50 mm keresztmetszetű, 280 mm magas téglalap alapú, üreges hasábtégelyek voltak, belül a talpazatuk közepéhez pedig vékony falú acélcső volt hegesztve (1. ábra). A folyamat az acéltégely belső felületének és a belehegesztett acélcső külső felének grafitemulzióval történő kikenésével kezdődött. Ezután az acéltégely oldalára hegesztett kivezető csőszakasz és az acéltégelyben lévő vékony falú acélcső közti teret alumínium-oxid paplannal kitöltöttük, amelynek szerepe az olvadéktól átfolyásának megakadályozása. A vékony falú acélcső oldalán is található egy kilevegőztető furat, aminek a tetejétől további ~ 5 mm magasságig alumínium-oxid paplan tömés került. Ezt követően erre a vastag paplanrétegre, az acélcső és téglék közti hézagot öntőforma homokkal töltöttük ki, amely homok, bentonit és víz elegyéből tevődik össze, így jó tapadást biztosít. A formázó homok funkciója, hogy ha öntés közben az olvadéktól a cső szája mellé folyrna, akkor se folyhasson az acélcső külső felé, így elkerülve, hogy felesleges anyagmennyiség hozzátapadjon a később felhasználandó funkcionális szerkezethez. A homok nagy hőterhelhetősége miatt pedig nem fog hozzátapadni az acélcsőhöz, így az öntés után könnyen letisztítható lesz a felületről. A belső cső köré, a felső részéhez is alumínium-oxid paplan tömítést tettünk, illetve a homokréteg tetejére is került egy réteg alumínium-oxid. Az acélcsőbe a megfelelő mennyiségű, $\varnothing 3,5\text{--}4,0$ mm átmérőjű duzzasztott agyagkavics került elhelyezésre, tetején egy rozsdamentes acélhálós, ami az elmozdulást és az agyagkavicsok felszínre úszását akadályozza meg, illetve egy acélháló feljebb is elhelyezkedett a megfelelő leszorítás biztosítása érdekében.



1. ábra. Egylépéses acélcsőbe töltött szintaktikus fémhab infiltrálásának sematikus ábrája

Az acéltégelyeket ezt követően előhevítés céljából Lindberg/Blue M kemencébe helyeztük, és 400°C hőmérsékletre hevítettük elő. A kemencében legalább 45 percen át hűtöttük, hogy a test minden pontján a kemence hőmérsékletével megegyező legyen a hőmérséklet. Mindez idő alatt a mátrix anyagként szolgáló AlSi10MnMg tömböt IND F-10 indukciós olvasztókemencében vörösösen izzó állapotig hevítettük. Ezt az állapotot elérve, az indukciós kemence kikapcsolása után, az olvadéktól hűlése közben, az olvadéktól hőmérsékletét egy Maxthermo MD-3003 K típusú digitális hőmérő segítségével mértük. Az alkalmazott mátrixanyag + töltőanyag + vékony falú acélcső rendszerben 820°C olvadéktól hőmérséklet volt szükséges a sikeres gyártáshoz, hogy az infiltrálás a kis előhevítési hőmérséklet mellett is teljesen megtörténjen. Az infiltrálásához szükséges nyomást jól szigetelt pipán keresztül adtuk rá a téglére. A nyomás nagynyomású argon palackból érkezett, az olvadéktól lenyomására $0,4$ MPa nyomást alkalmaztunk. Infiltrálás után a téglét folyó víz alatt lehűtöttük, majd a külső téglét eltávolítottuk, és a 2. ábrán látható állapotban kaptuk meg a gyártási folyamat végén.



2. ábra. Egylépéses gyártással acélcsőbe töltött szintaktikus fémhab, lehűlés után



3. ábra. Egy lépésben előállított, szintaktikus fémhabbal kitöltött vékony falú acélcső

Ezt követően a felesleges alumíniumot az acélcső tetejéről levágtuk, és ezzel az egy lépésben előállított, szintaktikusfémhab-töltetű funkcionális szerkezetet kaptuk végeredményként, amelynek metszeti képe a **3. ábrán** látható.

A szerkezet látszólagos sűrűségét geometriai és tömegmérések alapján határoztuk meg, értéke $2,30 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, amely az alkalmazott alumínium-ötvözet sűrűségénél ~15%-kal, az acélcső sűrűségénél pedig ~70%-kal kisebb.

4. Következtetések

A kutatás eredményeiből az alábbi következtetéseket vontuk le:

- a kisnyomású infiltrálás megfelelő eljárás a fémhabbal töltött acélcsövek egylépéses előállítására;
- a kutatás során megfelelő öntőtégelyt hoztunk létre a gyártáshoz;
- eredményül kis sűrűségű funkcionális szerkezetet kaptunk, amelyet beépítés előtt csak darabolni szükséges;
- érdemes a legyártott szerkezet további kutatása, a szakirodalom alapján elsősorban zömítő és hajlító tulajdonságainak feltérképezése.

Köszönetnyilvánítás

A publikáció az Innovációs és Technológiai Minisztérium NTP-SZKOLL-22-0080 kódszámú Nemzeti Tehetség Program pályázatának támogatásával valósult meg.

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

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Hong K., Kádár C., Knapék M., Drozdenko D., Jenei P., Kim M. Y., Choe H., Máthis K., Park H., Gubicza J.: *Comparison of morphology and compressive deformation behavior of copper foams manufactured via freeze-casting and space-holder methods*. Journal of Materials Research and Technology, 15/nov-dec. (2021) 6855–6865. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.108>.
- [2] Jenei P., Kádár C., Szabó Á., Hung S. M., Kuo C. J., Choe H., Gubicza J.: *Mechanical behavior of freeze-cast Ti foams with varied porosity*. Materials Science and Engineering: A, 855. (2022) 143911. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143911>.
- [3] Bálint A., Szlancsik A.: *Mechanical properties of iron hollow sphere reinforced metal matrix syntactic foams*. Materials Science Forum 812. (2015) 3–8. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.812.3>.
- [4] Banhart J.: *Metal foams – From fundamental research to applications [C]*. Frontiers in the Design of Materials (FDM 2005).
- [5] Movahedi N., Linul E.: *Quasi-static compressive behavior of the ex-situ aluminum-alloy foam-filled tubes under elevated temperature conditions*. Materials Letters, 206. (2017) 182–184. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.018>.
- [6] Linul E., Movahedi N., Marsavina L.: *The temperature effect on the axial quasi-static compressive behavior of ex-situ aluminum foam-filled tubes*. Composite Structures, 180. (2017) 709–722. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.034>.
- [7] Duarte I., Vesenjok M., Krstulović-Opara L., Ren Z.: *Static and dynamic axial crush performance of in-situ foam-filled tubes*. Composite Structures, 124. (2015) 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.01.014>.
- [8] Kemény A., Leveles B., Kincses D. B., Károly D.: *Manufacturing and Investigation of In Situ and Ex Situ Produced Aluminum Matrix Foam-Filled Tubes*. Advanced Engineering Materials, 24/1. (2022) 2100365:1–8. <https://doi.org/10.1002/adem.202100365>.
- [9] Chilla V., Mondal D. P., Ram G. D. J., Mukherjee M.: *Processing of in-situ aluminium foam-filled stainless steel tube with foam-tube bonding for enhanced crashworthiness*. Journal of Manufacturing Processes, 82. (2022) 488–500. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.020>.
- [10] Taherishargh M., Vesenjok M., Belova I. V., Krstulović-Opara L., Murch G. E., Fiedler T.: *In situ manufacturing and mechanical properties of syntactic foam filled tubes*. Materials & Design, 99. (2016) 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.077>.
- [11] Movahedi N., Murch G. E., Belova I. V., Fiedler T.: *Manufacturing and compressive properties of tube-filled metal syntactic foams*. Journal of Alloys and Compounds, 822. (2020) 153465. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153465>.



Rostirányban tömörített faanyag nyúlási tartalékának bizonyítása húzóvizsgálatokkal

Proof of the Elongation Reserve of Longitudinally Compressed Wood by Tensile Tests

Sajdik Tamás,¹ Báder Mátyás^{2*}

¹ Soproni Egyetem, Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar, Faipari és Műszaki Intézet. Sopron, Magyarország, sajdiktomi@gmail.com

² Soproni Egyetem, Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar, Faipari és Műszaki Intézet. Sopron, Magyarország, bader.matyas@uni-sopron.hu

Abstract

This paper deals with the proof of the theory of elongation reserve remaining in wood after compression parallel to the grain. After compression, the wood becomes much more pliable and the force required for bending is reduced. At the end of the 1-minute fixation following 20% compression, the compressive stress in the beech samples was reduced to an average of 72.3%, while the oak samples showed a 65.6% change. The remaining shortening at this time was 3-5%. At the end of the 3-hours fixation, the compressive stress had decreased to 37.1% for beech and 27.9% for oak, resulting in a residual shortening of 12-18%. An average maximum tensile force of 1.76 kN was required for untreated beech samples, which resulted in a 1.55 mm increase in size parallel to the grain. For specimens fixated for a short-time, a tensile force of 1.06 kN caused a 3.66 mm increase in size, while for specimens fixated for a long-time, a force of 0.85 kN caused an 8.79 mm increase in size. The trends were similar for oaks. The higher moisture content provided a significantly larger increase in size during the tensile tests. The existence of the elongation reserve was clearly confirmed.

Keywords: *wood compression parallel to the grain, compressive stress, tensile strength, tensile test, elongation reserve.*

Összefoglalás

A tanulmány a faanyag rostirányú tömörítésekor keletkező nyúlási tartalék elméletének bizonyításával foglalkozik. A tömörítési eljárás után a faanyag sokkal jobban hajlíthatóvá válik, továbbá a hajlításhoz kifejtett erőszükséglet is csökken. A 20% mértékű tömörítés utáni 1 perces fixálás végére a bükk mintáknál a nyomófeszültség átlagosan 72,3%-ra csökkent, míg a tölgyeknél 65,6% volt a változás. A maradó rövidülés ekkor 3–5%. A 3 órás fixálás végére bükk esetében 37,1%-ra, tölgyénél 27,9%-ra csökkent a nyomófeszültség, 12–18% maradó rövidülést eredményezve. A kezeletlen bükk minták húzóvizsgálatánál átlagosan 1,76 kN maximális húzóerőre volt szükség, mely 1,55 mm rostirányú méretnövekedést okozott. A röviden fixált mintáknál 1,06 kN erő 3,66 mm méretnövekedést, míg a hosszan fixáltaknál 0,85 kN erő 8,79 mm méretnövekedést okozott. A tölgyeknél ugyanígy alakultak a tendenciák. A magasabb nedvességtartalom lényegesen nagyobb rostirányú méretnövekedést biztosított a húzóvizsgálatok során. A nyúlási tartalék meglétét egyértelműen sikerült igazolnunk.

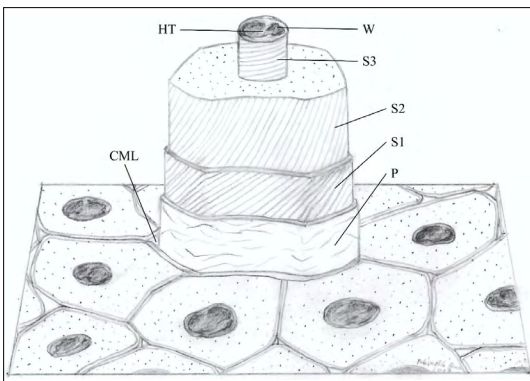
Kulcsszavak: *faanyag rostirányú tömörítése, nyomófeszültség, húzószilárdság, húzóvizsgálat, nyúlási tartalék.*

1. Bevezetés

1.1. A faanyag anatómiai felépítése

A faanyag mint természetes kompozit már az ősidők óta fontos alapanyaga az emberiségnek. Három fő alkotóelemből áll, cellulózból, ligninből és hemicellulózokból. Mielőtt rátérnénk a rostirányú tömörítésre, fontos tisztázni a faanyag általános szerkezeti felépítését, sejtszerkezeti összeállítását. A sejtek általában több sejtfalból épülnek fel, a külső falat elsődleges sejtfalnak hívják, míg az utána következő rétegeket másodlagos sejtfalnak szokás nevezni, azonban mivel ez háromrtegű, így külön jelzésekkel különböztetjük meg őket (S1, S2, S3) (1. ábra).

A sejtek felépítése mechanikai szempontból nagyon fontos, hiszen a szilárdság meghatározó tényező a faanyagok felhasználási területeinél. A sejtek hosszúkas felépítésűek; azokat a sejteket, amelyek a faanyag szilárdságát biztosítják, farostoknak nevezzük. A fatörzs felépítése tekintetében két nagy csoportot lehet megkülönböztetni: gesztet és szijácst. A geszt a fatörzs belső része, az aktív élettani folyamatokban nem játszik szerepet. Extraktanyag-tartalma a szijácshoz képest jellemzően rendkívül nagy, továbbá a geszt biztosítja a megfelelő szilárdságot. Azonban az inaktív sejtek köré kellene az élő sejtek is, melyek biztosítják a biológiai életét a fának. Ezt a funkciót látja el a szijác, melyben az edények és az edénykék szolgálnak víz- és tápanyagszállító csatornának. Azonban fontos megemlíteni, hogy szerkezeti felépítésükről eddig általánosságban volt szó. A tulajdonságok fajokonként eltérőek, de több szempontból lehet a fajokot csoportosítani. Jó példa erre a gyűrűs likacsú és a szórt likacsú fafajcsoportok markáns különbségei. Az eltéréseknek köszönhetően többféle ágazatban lehet a fajokot



1. ábra. A sejtal felépítése (forrás: [1])

alkalmazni. A faanyag-modifikációt sokféle céllal, elterjedten kutatják és alkalmazzák napjainkban. Célja, hogy bizonyos fafajok adott tulajdonságait javítsák, felhasználhatósági körüket növeljék.

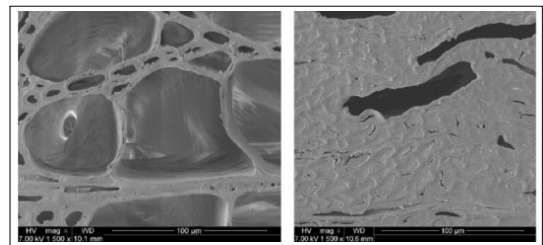
1.2. A nyúlási tartalék létezésének feltételezése

A rostirányban tömörített faanyag a kezelés hatására valamelyest véglegesen veszít eredeti hosszából. Számos folyamat játszódik le rostirányú tömörítés közben, ennek megfelelően számos elmélet látott napvilágot a jelentősen javuló hajlíthatóság magyarázatára. Az elsődleges elmélet, hogy a tömörítés során a sejtalak meggyűrűsével a faanyagban nyújtási tartalék keletkezik, vagyis a gyűrűt sejtalak később képesek kiegyenesedni (első megjelenései: [2, 3]). Ez azért fontos, mert a faanyag tönkremenetele hajlítás során jellemzően a húzott zónában következik be (szakadás), a faanyag csekély mértékű, rostirányú nyújthatósága következtében. Kutatásunk célja annak bizonyítása vagy pedig cáfolása a mért eredmények és azok elemzése ismeretében, hogy valóban keletkezik-e nyúlási tartalék a faanyagban a rostirányú tömörítés folyamán.

1.3. A tömörítés előzménye

Két nagy csoportot különböztetünk meg a tömörítési irány szempontjából. A tömörítést végezhetjük a rostokkal párhuzamosan, illetve a rostokra merőlegesen is (2. ábra). Az anatómiai irányok közötti különbség megmutatkozik a modifikációk céljaiban is. Rostiránnyal párhuzamos tömörítésnél az anyag sokkal jobban hajlítható lesz, míg a rostirányra merőleges tömörítésnél a sűrűséget tudjuk növelni, ezáltal az anyag sokkal keményebb lesz.

A faanyag hajlítását mint eljárást már az ókori Egyiptomban is alkalmazták. Akkoriban a faanyagot még csak gőzölték, aminek következtében az anyag meglágyult és hajlíthatóvá vált. Ez tette lehetővé a könnyebb alakváltoztatást az anyag törése nélkül. Miután beállították a megfelelő formá-



2. ábra. Bükk faanyag mikroszkópos képe keresztirányú tömörítés előtt és után (forrás: [3])

ra, hűtés és szárítás segítségével véglegesítették a változást, minimális visszarugózással. A módszert napjainkban is előszeretettel alkalmazzák, azonban a gőzöléses eljárás nagyon körülményes, és csakis nagyipari sorozatgyártásban gazdaságos. Ennek ellenére kifejlesztettek olyan rostlágyítási módokat is, melyeket Kollman [4] szintén megemlíti a tanulmányában. Léteznek olyan főzési módszerek, ahol a faanyagot timsóban vagy vízmentes folyékony ammóniában kezelik.

1.4. A rostirányú tömörítés fejlődése

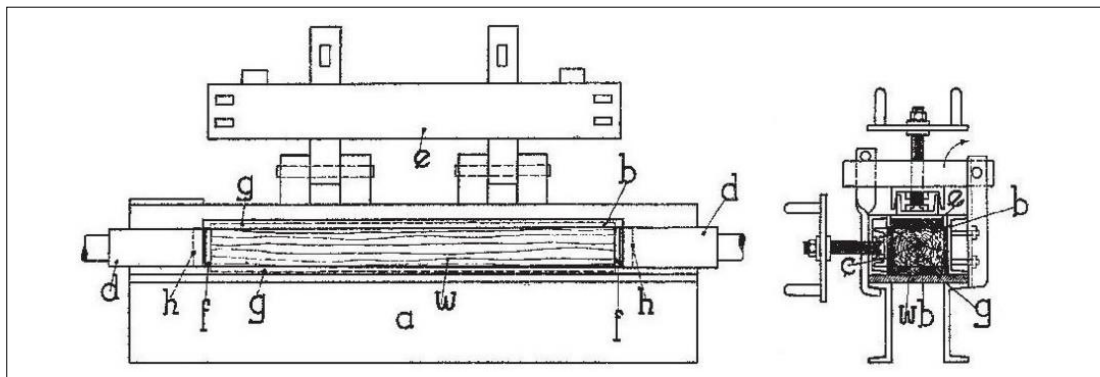
Ezt az eljárást először a Német Birodalomban dolgozták ki 1917-ben, ami lehetőséget biztosított a faanyag szobahőmérsékleten történő hajlítására [5]. A módszer elősegítette a faanyag hajlítását nagyobb erő-igénybevétel nélkül is, továbbá szintén előnyt jelentett, hogy a tömörített anyagot nem kellett újramelegíteni a nagymértékű hajlíthatóság eléréséhez. Fontos része volt az eljárásnak a tömörítés előtti gőzölés, melynek köszönhetően annyira meglágyultak a rostok, hogy ez lehetővé tette a tömörítést az anyag tönkremenetele nélkül. Az a faanyag, amelyet tömörítettek, utána már bármilyen hőmérsékleten formázható marad. A tömörített faanyagot a modifikáció után hűtötték, valamelyest szárították, ennek köszönhetően továbbfeldolgozhatóvá vált, és fel lehetett vágni deszkákra, pallókra, egyéb fűrészárura. Az alkalmazott eljárásról kijelenthető, hogy ebben az esetben egy termo-hidromechanikus modifikációról van szó.

1917-ben szintén megjelent egy szabadalom a Német Birodalomban, mely már az előző szabadalmat fejlesztette tovább nagyipari előállításra [6]. Ebben a fejlesztésben a fixálási időt (az az időszak, amíg a tömörített faanyagot összenyomott állapotban tartják) akarták kiváltani egy szorítóeszköz segítségével. Hétköznapi esetben a

préselés után az anyagot fixálódni hagyjuk a gép belsejében, ami a tömörítés hatására bekövetkezett tulajdonságváltozásokat tovább erősíti, azonban ilyenkor a gép nem alkalmazható további tömörítésre. A kifejlesztett eszköz segítségével fixált állapotban ki lehetett venni a gépből az anyagot, tartós fixálást biztosítva, majd így hűtötték és szárították. Eközben a gépben már elkezdődhetett a következő faanyag tömörítése. Sajnos a művelet annyira komplex volt, hogy az akkori technológia és a gyártási folyamatok nem tették lehetővé az elterjedését a faiparban. Ezt a típust 1926-ra továbbfejlesztették [7]. A Holzveredelung GmbH olyan gépet hozott létre, mely Hanemann előzetes szabadalmain alapul, azonban ez már sikeresen beilleszthető volt az akkori ipari folyamatokba, és valóban megvalósíthatóvá vált a termelés. Egy olyan belső betéttel dolgoztak ki, melynek köszönhetően préselés után a faanyagot egyből ki lehetett venni a gépből, és fixált állapotban tartotta azt (3. ábra). Közben már újra lehetett tölteni a tömörítőteret az újabb faanyaggal.

Az azóta eltelt évtizedek alatt, egészen napjainkig számos fejlesztést kezdeményeztek és hajtottak végre a szakértők, így az 1990-es évektől már PLC-vezérelt tömörítő berendezés is elérhető.

A Soproni Egyetemen 2015 óta lehetséges a rostirányú tömörítés. A méréseket és a tömörítőerőt Instron 4208 (Instron Corporation, USA) univerzális anyagvizsgáló gép biztosítja. Maga a tömörítési folyamat egy kifejezetten erre a célra kifejlesztett gépegységben történik, melyet a 2.2. alfejezet részletesen ismertet. A gép lehetőséget biztosít $20 \times 20 \times 200$, valamint $20 \times 30 \times 200$ mm nagyságú mintatestek rostirányú tömörítésére. Maximális tömörítési képessége lehetővé teszi, hogy a vizsgált anyagot rostirányban az eredeti mérethez képest akár 33%-kal kisebb méretűre préseljük. Oldalfalakba beépített fűtőszálak bizto-



3. ábra. Ipari felhasználásra gyártott első tömörítőgép (forrás: [7])

sítják a megfelelő hőmérsékletet, az oldallemezek pedig a megfelelő tömörítés elérésének érdekében képesek együtt mozdulni az éppen tömörödő faanyaggal [8, 9].

A rostirányban tömörített faanyag nagy előnye, hogy nyersanyag-felhasználás szempontjából nagyon gazdaságos. Az íves bútoelemek többnyire ragasztott vagy rétegelt-ragasztott elemekből készülnek, melyekhez sok ragasztóra és faanyagra van szükség. Ezzel szemben költséghatékony megoldást nyújt a rostirányban tömörített faanyag.

A rostirányban tömörített faanyag felhasználhatósági területeit tekintve rendkívül sokoldalú. Mint ahogy már említettük, kitűnően alkalmazható ívelt bútoelemek létrehozásához, továbbá rezgéscsillapított szerszámnnyelhez, íves képeretnek, autók belső borításánál, sportszergyártásnál, játékiparnál, valamint hangszergyártásnál is [3, 4, 10].

A tömörített faanyag esetében a gyártási túlméretezés elkerülhető, hiszen már a kész alakra lehet törés nélkül hajlítani, mindezek mellett a szállirány végig követi az alakzatot, nincsenek oldalt kifutó szálak. Az eljárás hátránya azonban, hogy a gőzölés hatására számolni kell az elszíneződéssel. Így esztétikailag meg kell válogatni, hogy hol érdemes felhasználni.

1.5. Tömörítésre alkalmas fafajok

Előzetes tanulmányok és kutatások figyelembevételére alapján kijelenthető, hogy tömörítésre a faanyagok széles köre alkalmazható. A lombos fafajok választékban nagyon bőveek, többségük kifejezetten alkalmas rostirányú tömörítésre, ilyen faj például a bükk (*Fagus sylvatica* v. *Fagus* ssp.), a tölgy (*Quercus* ssp., *Quercus petraea*, *Quercus velutina*), a fekete cseresznye (*Prunus serotina*), a kőris (*Fraxinus excelsior*, *Fraxinus americana*), valamint az ezüst juhar (*Acer saccharinum*) és a körtefa is [4]. Különböző szakirodalmakban elteréseket lehet olvasni, amikor az akác, a nyárfa vagy pedig a hárs iránt érdeklődünk. Ezeknek a fafajoknak a tömörítési tulajdonságai kétségesek.

Ahhoz, hogy a faanyag problémamentesen tömöríthető legyen, kifejezetten kell figyelni a felhasználandó anyag minőségére. Csakis egyenes növéssű fának a göcsmentes, keskeny évgyűrűs faanyag alkalmazható tömörítésre. Az anyag rostjainak iránya párhuzamos kell hogy legyen a munkadarab hosszanti élével, ez azt jelenti, hogy maximum 7°-os ferdeszálúságot lehet elfogadni. Maga az anyag minősége sokkal fontosabb tömörítésnél, mint az, hogy milyen módszerrel vágják ki a rönkből, ebben az esetben ez a szem-

pont elhanyagolható információ [11]. Álgesztre hajlamos faanyagoknál külön kell figyelni arra, hogy a felhasználandó faanyagban nem lehet álgeszt, mivel az más mechanikai tulajdonságú, és rontana a végeredményen. Göcsösség szempontjából a nagyméretű göcsök kerülendők, azonban a tűgöcsök megengedhetőek a felületen, de ezek sem túl szerencsések, hiszen ezek a pontok veszik fel a legnagyobb feszültséget, ami azt jelenti, hogy húzóvizsgálatok esetén ezeken a gyengített keresztmetszeteken megy majd végbe az esetleges tönkremenetel. A minták kialakításánál fontos figyelembe venni az alaki tényezőt is, ugyanis gőzölés és főzés hatására az anyag keresztmetszeti változásokon megy keresztül. Ez a nedvességtartalom változásának köszönhető. Lehetőség van az alapanyagok csoportos tömörítésére is. Fontos azonban, hogy csakis egy fajfajt lehet csoportosan tömöríteni, hiszen gépbe való elhelyezésük akkor lehetséges, ha egy anyagként viselkednek.

A faanyag sejtszerkezetében kétfajta vizet különböztetünk meg, szabad vizet és kötött vizet. A szabad víz a sejtek belsejében, a sejtüregekben található meg, míg a kötött víz inkább a sejteknek a falán telepszik meg. Rosttelítettségi pontnak nevezzük azt az állapotot, mikor a sejtüregekben nem található szabad víz, de a kötött víz a lehető legnagyobb mennyiségben halmozódik fel a sejtek falán és falában. A rosttelítettségi pont fafajonként eltérő, bükk esetében 35,6%, míg tölgy esetében 24,5% [12]. Ha a fafajok különböző rosttelítettségi állapotait átlagolnánk, akkor nagyjából 30%-ot kapnánk. Ennek az értéknek köszönhetően a gyakorlatban szintén ezt az értéket alkalmazzák nagy mennyiségű faanyag esetén. Tömörítésre az élőnedves, de legalább 16%-os nedvességtartalmú faanyag alkalmas [13]. Más vélemény szerint a tömörítéshez alkalmas faanyag nedvességtartalma akkor megfelelő, ha az 2–8%-kal kisebb a rosttelítettségi pontnál [14].

2. Anyagok és műszerek, a technológia folyamatainak ismertetése

2.1. Rostlágítási folyamat

A modifikációs eljárás három fontos részből tevődik össze: rostlágításból, magából a tömörítésből és az utókezelésből. A fa üreges sejtszerkezetének köszönhető, hogy a tömörítést roncsolásmentesen végezhet lehet vinni, azonban mivel a kezeletlen anyag nagyon merev, a könnyebb alakíthatóság, a rostlágítás érdekében mindig gőzölni/főzni kell előtte. Kémiai szempontból a megfelelő mennyiségű hő és nedvesség hatására

a hemicellulózok és a lignin változnak, ez lehetővé teszi, hogy csökkenjenek a faanyagok a tömörítés szempontjából fontos mechanikai tulajdonságainak értékei, mint a rugalmassági modulus. A cellulózrostok együtt merev szerkezetet alkotnak a sejtfalban, azonban a hő és a nedvesség hatására az őket összekötő, főként ligninből és hemicellulózokból álló mátrixanyag meglágyul [15], és képesek elcsúszni egymáshoz képest a tömörítés és a hajlítás közben. A faanyag gőzölés során nagyjából 100 °C körül elkezd bomlani. Kezdetben a hemicellulózok károsodása figyelhető meg, aminek köszönhetően csökken a faanyag ellenálló képessége nyomással szemben, vagyis rostirányú tömörítésnél kifejezetten előnyös ez az állapot. A faanyag átmelegedésének irányértéke 2 min/mm [16, 17], ezt az értéket figyelembe véve kell meghatározni, a tömöríteni kívánt keresztmetszettől függően, a megfelelő gőzölési időt.

Összességében kijelenthető, hogy a faanyagot tömörítés előtt a jobb alakíthatóság érdekében mindig gőzölni kell 80–100°C közötti hőmérsékleten, így megfelelő lesz a rostlágyítás mértéke a tömörítés elkezdéséhez (4. ábra).

2.2. Instron 4208-as anyagvizsgáló gép alkalmazása tömörítéshez

A korábban említettek szerint a Soproni Egyetemen 2015 óta lehetséges a rostirányú tömörítés. A technológia alkalmazásához szükség volt egy megfelelő nagyságú erő kifejtéséhez alkalmas gépre (Instron 4208), valamint egy tömörítőegységre, melyet rá lehet kapcsolni a gépre (5. ábra).

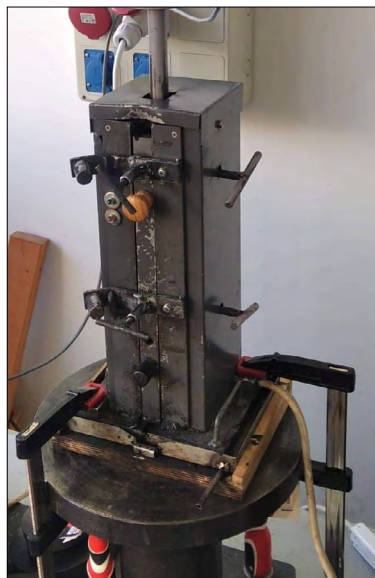
A tömörítőegység felépítése egyszerű, funkcióját tökéletesen ellátja. Két fő részből épül fel. Egy merev falú tömörítőkamrából, melynek a belső oldalfalai képesek a tömörített anyaggal együtt mozdulni, illetve fűtött külső oldalfalból, mely biztosítja a megfelelő hőmérsékletet a tömörítés idejére (6. ábra).

A tömörítési program beállításai megfeleltek minden minta esetében, egyedül egy paramétert változtattunk, a fixálási időt. A fixálási idő nagysága nagyban meghatározza az anyagtulajdonságok változásának mértékét, a nagyobb fixálási idő nagyobb maradó rövidülést okoz, és ezzel együtt valószínűsíthetően a nyúlási tartalék is növekszik.

A kutatás során két fafajt vizsgáltunk, bükköt (*Fagus sylvatica*) és kocsánytalan tölgyet (*Quercus petraea*), illetve két fixálási időt alkalmaztunk fafajonként: egyperces (rövid fixálás), illetve háromórás fixálási időt (hosszú fixálás). Ennek értelmében négy tömörített minta-csoportot különíthettünk el a kezeletlenek mellett.



4. ábra. A minták gőzöléséhez használt edény



5. ábra. A tömörítőegység közelről



6. ábra. A tömörítőegység belső felépítése

2.3. Tömörítés rostirányban

Miután a rostlágyítási folyamat befejeződött, megkezdődhet a tömörítés. A tömöríteni kívánt testet behelyezzük a tömörítőkamrába, ahol nagy nyomás segítségével a mintákat összepréseljük, ilyenkor akár 33%-os méretcsökkentést is el lehet érni az anyag roncsolása nélkül. Fontos megemlíteni, hogy a 33%, legnagyobb tömörítési értéket az általunk használt laboratóriumi tömörítőberendezés határozza meg. Minden fafajnak megvan a tömöríthetőségi határa, melyet meghaladva az anyag már lényeges szerkezeti roncsoláson megy keresztül, így tönkremegy, hajlításra nem lesz alkalmas. Korábbi, nem publikált kutatások alapján például tölgy esetében 21–23% a legnagyobb tömöríthetőségi arány a tönkrementelig, míg bükk esetében akár a 30%-ot is elérheti. A vizsgálataink során a tömörítést 20%-os, rostirányú méretcsökkenéssel végeztük el minden mintacsoportnál, ezzel garantálva a megfelelő tömörítést jelentősebb szerkezeti roncsolások nélkül. A relatív tömörítési sebesség 25%/min volt [1].

A megfelelő préselési arány elérésekor megkezdődhet a fixálás, ahol a belső feszültségek csökkennek, és a maradék rövidülés, valamint hajlíthatóság növekszik. Fontos megemlíteni, hogy minél hosszabb ideig végezzük a fixálást, annál kisebb lesz az anyag visszarugóása.

2.4. Tömörített faanyag utókezelése

Miután kivesszük a próbadarabokat a tömörítőkamrából, megkezdődhetnek az utókezelési folyamatok. Mivel tömörítés előtt gőzölésre van szükség, így nagy a faanyagok nedvességtartalma a folyamat befejezte után, ezért utókezelésként következik a szárítás. Szárításra többféle módszer lehet alkalmazni, ennek kiválasztása a faanyag adott felhasználási területétől függ. Fontos azonban megemlíteni, hogy a szárításkor a faanyag hajlíthatósága rohamosan romlik, ennek legfőbb oka a nedvesség csökkenése. 0–5% nedvességtartalomnál gyakran előfordul, hogy a kezeletlen faanyagnál is ridegebb lesz a rostirányban tömörített faanyag. Összességében tehát megállapítható, hogy a szárítás mint utókezelési folyamat záró műveletként szolgál. A tömörített anyagot a kívánt formára hajlítjuk, majd ezt az alakváltozást véglegesítjük a szárítással. Fontos azonban, hogy a hajlított anyagot a hajlításablonra rögzítve kell szárítani, így biztosan nem fognak alaki eltérések keletkezni a folyamat végeztével. Korábbi vizsgálatok kimutatták [9], hogy a rostirányban tömörített faanyag hajlíthatósága akkor a legnagyobb,

amikor rosttelítettséghez közeli állapotban van.

A tömörített anyag hajlíthatósága megőrizhető, de ehhez megfelelő nedvességtartalmi állapot szükséges. Ez azt jelenti, hogy a megfelelő klimatikus feltételek betartása mellett a tömörített faanyagot nem fontos azonnal felhasználni, hanem tökéletesen lehet raktározni, ezzel megkönnyítve a nagy anyagfelhasználású gyárak sorozatgyártását.



7. ábra. 20×30×200 mm méretű bükk mintatest



8. ábra. Hosszan fixált, röviden fixált, kezeletlen bükk mintákból kialakított félkész húzóvizsgálati mintatestek



9. ábra. Hosszan fixált, röviden fixált és kezeletlen minták, húzóvizsgálathoz kialakított profillal

2.5. Húzóminták kialakításának folyamata

Az eljárás során 20×30×200 mm-es mintatesteket tömörítettünk (7. ábra), azonban ezek még túl nagyok voltak ahhoz, hogy húzóvizsgálatoknak vethessük alá őket.

Minden nagyméretű mintát felszeleteltünk 2 mm vastag kis próbatestekre (2×20×160–200 mm kezeléstől függően), egy nagy mintából általában 4 kis mintát lehetett kialakítani, figyelembe véve a vágási rés szélességét is (8. ábra).

A felszeletelt mintákat kézi marógép segítségével egységesített profilra kimartuk, melyek már alkalmasak voltak a húzóvizsgálatok elvégzéséhez (9. ábra). Így a vizsgált rész minden húzómintánál 2×8×50 mm lett.

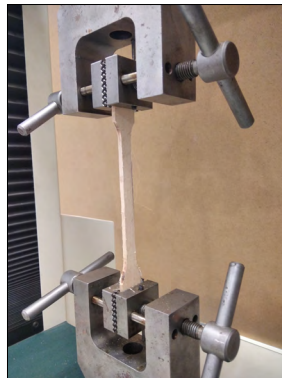
A 8. ábrán a bal oldali minta jól láthatóan görbe, ezért a profil is az eredeti alakhoz igazodva lett kialakítva. Háromórás fixálás esetén a nagy minták többsége a tömörítőberendezésből kivéve meggörbült. Mint ahogyan említettük az 1.5. alfejezetben is, fontos, hogy minden rost párhuzamosan helyezkedjen el a mintatestben, a párhuzamosság megőrzésének érdekében igazodni kell a húzó minta kialakításának az anyag görbületéhez, így nem lesz szálfifutás, ami a húzóvizsgálatnál hibás méréshez vezethet.

Bükk és tölgy esetében összesen három-három mintacsoportot alakítottunk ki: hosszan fixált, röviden fixált, valamint kezeletlen faanyagokat vizsgáltunk. A három fő mintacsoport különböző előkezeléseken esett át, ennek az volt a célja, hogy szélesebb körben tudjunk vizsgálatokat elvégezni.

Az első fajta előkezelés során a mintákat 65%-os páratartalom mellett 20 °C hőmérsékleten 12% nedvességtartalomra kondicionáltunk (normál körülmény). A második fajta előkezelésnél először abszolút szárazra szárítottuk a mintákat, majd kondicionáltuk őket normál körülmények között. A harmadik fajta előkezelésnél élőnedveshez közeli állapotban tároltuk a mintákat, amit úgy értünk el, hogy lefagyasztottuk őket, hogy a víz a fatestben szilárd molekulákat alkosson, ezzel megakadályozva az elpárolgást és a biotikus károsítók megjelenését. Mintacsoportonként átlagosan 40 húzómintát vizsgáltunk, vagyis összesen 240 darab minta adatai lettek feldolgozva.

2.6. Húzóvizsgálatok

Miután a minták kialakítását, illetve a mintacsoportok összeállítását befejeztük, a faanyagokat húzóvizsgálatoknak vetettük alá. A vizsgálatok elvégzéséhez egy Tinius Olsen (Tinius Olsen Ltd. Redhill, England) gyártmányú H10KT anyagvizs-



10. ábra. Húzó minta befogatása az anyagvizsgáló gépbe

gáló gépet használtunk. Az alsó húzófej fix állású, míg a felső fej a „z” koordináta irányában képes mozogni (10. ábra).

Mivel a hosszan fixált, a röviden fixált, valamint a kezeletlen minták szilárdsága és nyújthatósága jelentősen eltért, így mindegyik mintacsoportnál más húzási sebességet választottunk. Célunk az volt, hogy minden minta egységes időintervallumban menjen tönkre, ahogyan azt a kapcsolódó vizsgálati szabvány (ISO 13061-6:2014 [18]) meghatározza. A tönkremeneteli időket figyelembe véve a helyes húzási sebesség a kezeletlen minták esetében 3 mm/s, röviden fixált mintáknál 4 mm/s, valamint a hosszan fixált minták esetében 8 mm/s volt.

3. Eredmények és értékelés

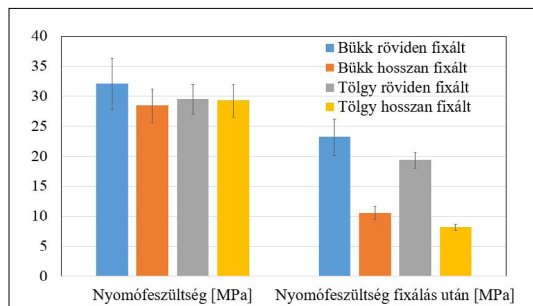
3.1. A nyomófeszültség változása a fixálás hatására

A rostirányú tömörítés során a faanyag végig plasztifikált állapotban van, így kerülhető el a tönkremenetele. A 20%-os tömörítési arány eléréséhez jelentős erőhatásra volt szükség, amit minden bemutatott mintatestünk tönkremenetel nélkül elviselt. A 20%-os tömörítési arány elérésekor mért nyomóerőt a keresztmetszettel elosztva kaptuk meg a legnagyobb nyomófeszültség értékét, ami az eljárás közben fellépett. Az összenyomást állandó értéken tartva (fixálás) ez a feszültség kezdetben gyors ütemben, majd fokozatosan lassulva csökkent, ahogyan a viszkoelasztikus anyagok feszültségrelaxációjára jellemző. Az elvégzett tömörítésekre a bükk- és a tölgy minták eltérő módon reagáltak. A 11. ábrán bemutatottak szerint a 20% mértékű tömörítést követően az egypercnyi fixálás hatására a bükk minták nyomófeszültsége 72,3%-ra csökkent, míg tölgy mintáknál ugyanez

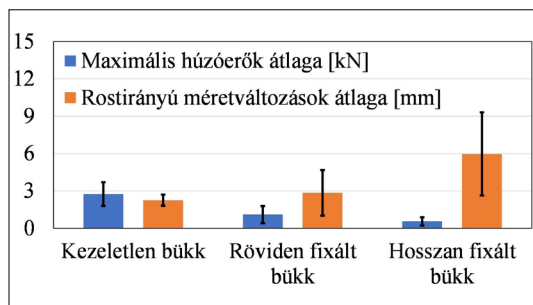
65,6% volt. A hosszú fixálás (3 órán keresztül összenyomva tartás) bükk esetében 37,1%-ra, míg tölgyenél 27,9%-ra csökkentette a nyomófeszültséget. Megjegyzendő, hogy a jelentős különbség a szobahőmérsékletűre hűlés következménye is. Egyúttal jelentősen megváltozott a faanyagok szerkezete mind a tömörítés, mind a hosszú fixálás hatására, amint azt bemutatták mikroszkópos elemzéssel [9]. A maradó rövidülési értékeket elemezve elmondható, hogy a tölgyek minden esetben nagyobb maradó alakváltozást szenvedtek, mint a bükkök. 20% összenyomás és rövid fixálás után 3–5% volt az alakváltozás, míg a hosszan tartó fixálás a mintáknak 12–18% maradó rövidülését eredményezte. Ezek nagyon jelentős mértékű változások, melyek komoly anatómiai-fizikai-mechanikai tulajdonságváltozásokkal párosulnak. Erről számol be a 11. ábra, mely a tömörítés utolsó pillanatában mért nyomófeszültséget és a fixálás végén kapott nyomófeszültséget mutatja be. Általánosságban elmondható, hogy az egyperces fixálás során a tömörítéskor létrejött nyomófeszültség harmada épült le, míg a háromórás fixálás végére a nyomófeszültség lényegesen jobban, kétharmadával csökkent.

3.2. A visszarugózás mértékének és a húzóvizsgálathoz szükséges erő kapcsolata

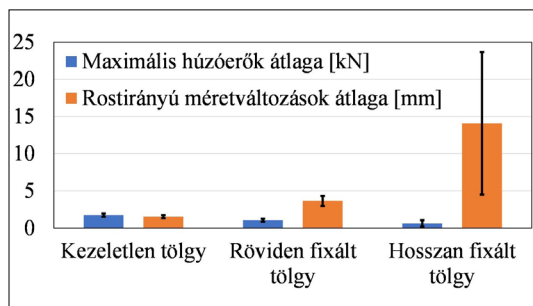
A 20 °C hőmérsékleten 65%-os páratartalom mellett 12% nedvességtartalomra kondicionált (normál körülmény) minták esetében mindkét fajtánál megfigyelhető, hogy a húzóvizsgálatok során ellentétesen alakulnak a rostirányú méretváltozáshoz viszonyított húzóerők, ezek a változások megfigyelhetőek a 12. és a 13. ábrákon is. A kezeletlen bükk mintáknál alkalmazott húzóerő a szakadás pillanatáig átlagosan 1,76 kN volt, mellyel átlagosan 1,55 mm mértékű rostirányú méretnövekedést lehetett elérni. A röviden fixált mintáknál már láthatóan kisebb erőre volt szükség, átlagosan 1,06 kN-ra az átlagosan 3,66 mm-es rostirányú méretnövekedés eléréséhez, azonban a leglátványosabb eredményeket a hosszan fixált mintáknál kaptuk. Mindössze 0,85 kN átlagerő elég volt ahhoz, hogy az anya rostirányú méretét átlagosan 8,79 mm-rel növeljük. Ez azt jelenti, hogy a fixálási idővel fordítottan változik a húzóerő nagysága egy adott mértékű megnyúláshoz. A hosszan fixált minták esetében, melyek 3 órán át voltak folyamatos nyomás alatt, sokkal kisebb erő igénybevételével véghez tudjuk vinni az egysegnyi mértékű rostirányú méretnövelést. Ez a megállapítás az összes többi mintacsoportra is igaz volt a mérések során.



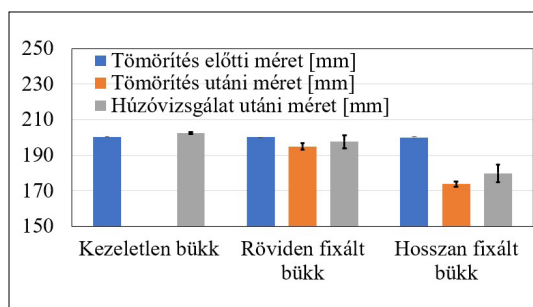
11. ábra. Nyomófeszültségek a tömörítést és a tömörítés utáni fixálást követően



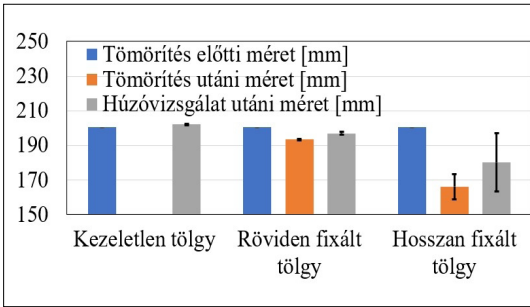
12. ábra. Bükk faanyag húzóvizsgálatának összefüggései



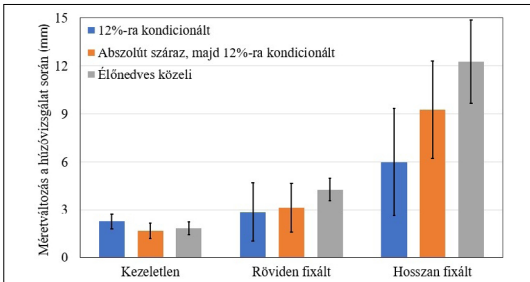
13. ábra. Tölgy faanyag húzóvizsgálatának összefüggései



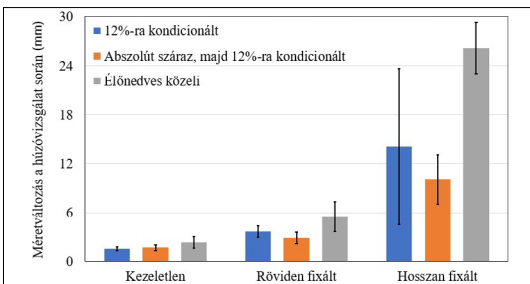
14. ábra. Bükk minták átlagos mérete a rostokkal párhuzamos irányban a vizsgálat különböző fázisaiban



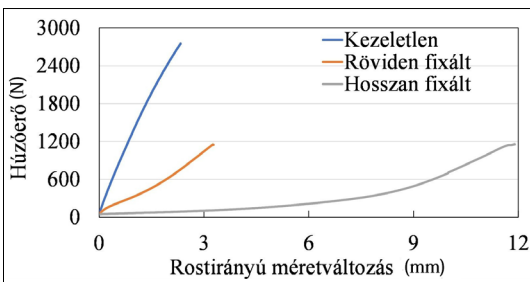
15. ábra. Tölgy minták átlagos mérete a rostokkal párhuzamos irányban a vizsgálat különböző fázisaiban



16. ábra. Bükk mintacsoportoknak a húzóvizsgálat során mért rostirányú méretváltozás-átlagai különböző nedvességtartalmak mellett



17. ábra. Tölgy mintacsoportoknak a húzóvizsgálat során mért rostirányú méretváltozás-átlagai különböző nedvességtartalmak mellett



18. ábra. Bükk élőnedves állapothoz közeli csoportok egy-egy tipikus mintájának erő-elmozdulás grafikonja

3.3. Méretek változása a fixálási idő függvényében

Mindkét vizsgált fafajnál eltérnek a minták hosszmeretei a kezelés következtében (kezeletlen, röviden fixált és hosszan fixált csoportok). Tökéletesen kimutatható, hogy a rostirányú méretváltozási képesség tekintetében a hosszú fixálás bizonyult a leghatásosabb eljárásnak, hiszen a tömörítés utáni méretéhez képest ennél a csoportnál lehetett elérni a legnagyobb rostirányú méretváltozást, ahogyan a 14. és a 15. ábrán látható. Ez összhangban van Báder és Németh [19] megállapításával, miszerint a 20%-ban tömörített minták lehajlása 4 pontos hajlítóvizsgálat során 3-4-szeres a kezeletlenekéhez képest, míg a hosszú ideig fixáltak legalább hatszoros lehajlást képesek elviselni.

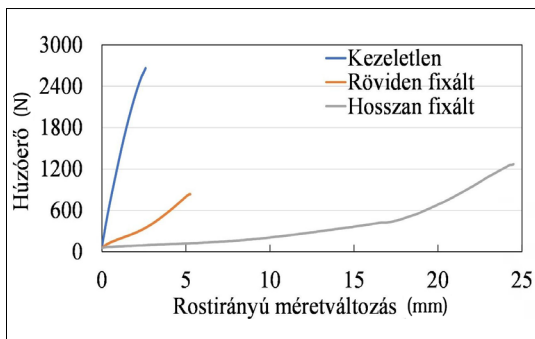
3.4. A nedvességtartalom befolyása a húzóvizsgálati minták rostirányú méretváltozására

A 16. és 17. ábrák diagramjain összegezve vannak fafajra lebontva a rostirányú méretváltozások átlagai mind a három mintacsoport esetében. Tökéletesen látható, hogy majdnem minden esetben azoknak a mintáknak volt a legnagyobb a rostirányú húzóvizsgálat közben létrejövő alakváltozása, amelyek abba a mintacsoportba tartoztak, amelyeket az eredeti, nagy nedvességüket megtartva vizsgáltunk. Ez a megállapítás alátámasztja korábbi kutatások eredményeit is [9], miszerint a faanyag hajlíthatósága/nyújthatósága akkor a legnagyobb, amikor rosttelítettséghez közeli állapotban van. A többi mintacsoport sokkal kevesebb vizet tartalmazott, mint ez a mintacsoport, így ez állt a legközelebb a rosttelítettség határhoz.

3.5. Élőnedves állapothoz közeli mintacsoportok viszonya

Érdekes módon nagyon sok azonosságot lehet megfigyelni a 18. és a 19. ábrán található görbékben a két faj tekintetében.

A 18–19. ábrán a kezeletlen minták rostirányú méretváltozás-húzóerő grafikonjai élesen felfelé ívelnek, vagyis nagy erő kifejtése szükséges kis megnyúlás eléréséhez. A röviden fixáltak esetében a kezeletlenekével azonos rostirányú méretváltozáshoz lényegesen kisebb erőre volt szükség, azonban itt már a szakadási nyúlás is jelentősebb, mint az előző esetben. Végül a hosszan fixált minták grafikonja mutatja a leglátványosabb eltérést, hiszen itt már a nagymértékű sejtszerkezeti változásoknak köszönhetően [19] a kezeletlen mintákhoz viszonyított töredék maximális erővel



19. ábra. Tölgy élőnedves állapothoz közeli csoportok egy-egy tipikus mintájának erő-elmozdulás grafikonja

tudjuk elérni a szakadás pillanatában bekövetkező legnagyobb rostirányú méretváltozást.

4. Következtetések

A tanulmány célja a rostirányban tömörített faanyagok nyúlási tartalék elméletének bizonyítása, illetve a modifikációs folyamattal járó különböző anyagszerkezeti változások mechanikai hatásainak vizsgálata és összehasonlítása a kezeletlen faanyag mechanikai tulajdonságaival.

A fentiekben szemléltetett adatok és diagramok bizonyítékként szolgálnak a nyúlási tartalék létezésére, melynek ismerete fontos tényezőként szolgálhat a rostirányban tömörített faanyag további tudományos vizsgálatainál, valamint a gyakorlati, pl. bútorigipari alkalmazásánál, ahol íves elemeket készíthetnek belőle. A nyúlási tartalék figyelembevételével pontosabban kalkulálható a tömörített anyag méreteinek, illetve hajlékonyságának változása, mely megkönnyíti majd a jövőben az íves elemek gyártását.

A vizsgálatok során nemcsak a nyúlási tartalék létezésére leltünk bizonyítékot, hanem egyúttal korábbi vizsgálatok megállapítására is egyértelmű magyarázatot találtunk: a rostirányban tömörített faanyag hajlíthatóságának jelentős növekedése a rostirányú méretnövekedési képesség javulásának eredménye. Ezenfelül bizonyítottuk, hogy a minták rostirányú méretnövekedési képessége lényegesen nagyobb a rosttelítettségi állapothoz közeli nedvességtartalomnál, mint 12% nedvességtartalmú állapotban.

A későbbiekben bővíteni fogjuk a vizsgált mintacsoportok számát, melyeket más előkezeléseknek fogunk alávetni a húzóvizsgálatok előtt, ilyen például a 20–25%-os nedvességtartalmú, valamint a műszárított minták vizsgálata.

Köszönetnyilvánítás

Jelen cikk a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-1-I-SOE-76 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Báder M.: *A természetes faanyag tulajdonságainak módosítása termo-hidromechanikus és vegyi eljárásokkal*. Doktori értekezés, Soproni Egyetem, Sopron, 2021. 1–138.
- [2] Hanemann M.: *Processes for making wood everlastingly flexible*. US Patent Office No. 1 457 974, USA, 1920.
- [3] Vorreiter L.: *Holztechnologisches Handbuch*. Band I. Georg Fromme & Co., Wien, 1949. 1–548.
- [4] Kollmann F. F. P.: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe II*. Springer-Verlag, München, 1955. 1–1183.
- [5] Hanemann M.: *Holzaufbereitungsverfahren*. Deutsches Reich Reichspatentamt No. 318197, Németország, 1917.
- [6] Hanemann M.: *Holzaufbereitungsverfahren – Zusatz zum Patent 318197*. Deutsches Reich Reichspatentamt No. 321629, Németország, 1917.
- [7] Holzveredelung Ltd.: *Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von weichbiegsamen Holz*. Deutsches Reich Reichspatentamt, No. 458923, Németország, 1926.
- [8] Báder M., Németh R.: *Faanyagok rostirányú tömörítésének kísérleti körülményei-1. rész*. Gradus, 4/2. (2017) 403–411.
- [9] Báder M., Németh R.: *Moisture-dependent mechanical properties of longitudinally compressed wood*. European Journal of Wood and Wood Products, 77. (2019) 1009–1019. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01448-1>
- [10] Báder M., Németh R., Ábrahám J.: *Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése-2. rész: Történelem és szabadalmak. A tömörítési folyamat tulajdonságai és a tömörítést követő eljárások*. Faipar, 63/1. (2015) 10–20.
- [11] Szabó I.: *Fahajlítás*. In: *Faipari kézikönyv II*. (szerk.: Molnárné P. P.). Faipari Tudományos Alapítvány, Sopron, 2002. 60–61.
- [12] Molnár S.: *Faanyagismeret*. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 1999. 1–469.
- [13] Buchter J., Adelhoej J., Ljoerring J., Hansen O.: *Introducing Compressed Wood*. Danish Technological Institute, Department of Wood and Furniture, Taastrup, 1993. 1–32.
- [14] Kuzsella L.: *Rostirányú tömörítés hatása a bükk faanyag szerkezetére és mechanikai tulajdonságaira*. Doktori értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2011. 1–151.

- [15] Winkler A.: *Farostlemezek*. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 1999. 1–172.
- [16] Stevens W. C., Turner N.: *Solid and laminated wood bending*. His Majesty's Stationery Office, London, 1948. 1–100.
- [17] Peres M. L., Gatto D. A., Delucis R. A., Beltrame R.: *Vergamento madeira sólida: quallade de processo e matéria-prima*. Nativa-Agricultural and Environmental Research, 1. (2013) 56–61.
- [18] ISO 13061-6: Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 6: Determination of ultimate tensile stress parallel to grain. 2014.
- [19] Báder M., Németh R.: *The effect of the relaxation time on the mechanical properties of longitudinally compressed wood*. Wood Research, 63/3. (2018) 383–398.



Akrilnitril-butadién-sztirol (ABS) lemezek kavaró dörzshegesztésének erőtani és kötőszilárdsági vizsgálata

Investigation of Welding Forces and Weld Strength for Friction Stir Welding of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Plates

Stadler Róbert Gábor,¹ Horváth Richárd²

¹ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Anyagok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest, Magyarország, stadler.robort@bgk.uni-obuda.hu

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

The purpose of this study is to investigate the applicability of the friction stir welding technology to acrylonitrile butadiene styrene (ABS) type polymer and the effect of welding parameters on the force values and weld strength during he-welding. The tests were carried out on 4 mm thick ABS sheets using a conventional mould design. The input parameters (speed – n , feed rate – v_f) were varied in 3-3 steps and a complete set of experiments was performed. From the force measurements, it was concluded that the force values in the feed direction (F_y) and axial direction (F_z) are the dominant force values during welding. The force components decrease with increasing speed and n/v_f ratio, while they increase with increasing feed rate. The tensile strength of the weld improves with increasing speed and n/v_f ratio, while they deteriorate with increasing feed rate. The best weld strength (10.69 MPa) was measured at 1000 rpm and 50 mm/min feed rate.

Keywords: *friction Stir Welding, ABS, welding force, joint efficiency.*

Összefoglalás

Jelen tanulmány célja, hogy megvizsgáljuk a kavaró dörzshegesztés technológia alkalmazhatóságát akrilnitril-butadién-sztirol (ABS) típusú polimerre, valamint a hegesztési paraméterek hatását a hegesztés során fellépő erőkre és a hegesztési varrat szilárdságára. A vizsgálatokat 4 mm vastag ABS-lemezekon hajtottuk végre, hagyományos szerszámkialakítás mellett. A bemeneti paramétereket (fordulatszám, előtolási sebesség) 3-3 szinten változtattuk, és teljes kísérlettervet hajtottunk végre. Az erőmérésekből azt a következtetést vontuk le, hogy a hegesztés során fellépő erőértékek közül az előtolási irányú erő (F_y) és az axiális irányú erő (F_z) a domináns. A fordulatszám és az előtolási sebesség (n/v_f) arányszáma növelésével csökkennek az erőkomponensek, míg az előtolási sebesség növekedésével nőnek. A varrat szakítószilárdsága a fordulatszám és az n/v_f arányszám növelésével javul, míg az előtolási sebesség növelésével romlik. A legjobb varratszilárdságot (10,69 MPa) 1000 1/perc fordulatszámon és 50 mm/perc előtolási sebességnél mértük.

Kulcsszavak: *kavaró dörzshegesztés, ABS, hegesztési erő, hegesztési hatékonyság.*

1. Bevezetés

A kavaró dörzshegesztés (FSW) egy mechanikai súrlódás elvén alapuló hegesztési eljárás, amelyet a 90-es évek elején szabadalmaztattak [1]. Az eljárás kifejezetten sikeres és népszerű lett, például az alumínium esetén. Olyan iparágakban alkal-

mazzák, mint a repülőgépipar [2, 3, 4]. Egyelőre ipari szinten csak alumínium esetén alkalmazzák, de kutatási szinten már vannak publikációk magnézium [5], titán [6] és réz [7] anyagok hegesztési kísérleteiről. A kavaró dörzshegesztést nem csak a fémek anyagok hegesztésére vizsgálják. Számos tanulmány foglalkozik a különböző polimerek és

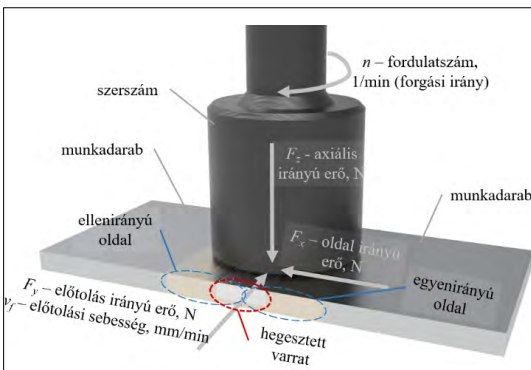
szálerősítésű, hőre lágyuló műanyagok [8] kavaró dörzshegesztésének vizsgálatával. Az eljárás egyik legnagyobb előnyének azt tartják, hogy szálerősített, hőre lágyuló műanyagok hegesztésére is alkalmas [9]. A kavaró dörzshegesztés ezenkívül energiahatékony, illetve környezetbarát, ugyanis nincs szükség sem segédanyagra, sem védőgázra [10].

Az eljárás lényege, hogy egy forgó, speciális vállú és csapeometriájú szerszámmal végighaladunk az érintkező és egymással összehesztendő munkadarabok között. A munkadarabok és a forgó szerszám között fellépő súrlódás állítja elő a hegesztéshez szükséges hőmérsékletet. Emellett a szerszám fontos feladata, hogy a megömlesztett anyagot keveri, áramoltatja a hegesztési zónában, ezzel biztosítva az egyenletes varratot. A hegesztési folyamat közben alkalmazott szerszámot a hegesztendő lemezek vastagságát megközelítő fogásmélységgel süllyeszti a hegesztendő anyagok közé. Miután a szerszám a hegesztési pálya végére ér, kiemelik a hegesztési zónából. A kavaró dörzshegesztés sematikus ábráját, valamint az eljárási során fellépő és mért erőkomponenseket az 1. ábra mutatja.

Az ABS az egyik legelterjedtebb, hőre lágyuló műanyag, amelyet gépjárművekben és sok háztartási készülékben is nagy mennyiségben megtalálunk. Köszönhető ez annak, hogy könnyen feldolgozható, illetve nagy a merevsége, karcállósága és tartóssága [11].

Az elmúlt években számos publikáció foglalkozott az ABS kavaró dörzshegesztésével is.

Arvin és tsi. [12] ABS-lemezek kavaró dörzshegesztését tanulmányozták. A hegesztéshez speciális, fűtött vállú szerszámot használtak. A szerszám átmérője 10 mm, a csapeometria pedig menetes volt. A vállat elektromos fűtőtesttel látták el, amivel a váll hőmérsékletét szabályozni



1. ábra. A kavaró dörzshegesztés sematikus ábrája

tudták. A vizsgálataik során három paramétert (szerszámfordulatszám, előtolási sebesség és a szerszám kezdeti hőmérséklete) változtattak három szinten. Teljes kísérlettervet alkalmaztak, így 27 mérési pontban végeztek kísérleteket. A mérések során a kimenő paraméterek a varrat szakítószilárdsága és a kötési hatékonyság (a varrat és az alapanyag szakítószilárdságának aránya) volt. A mérési eredményeiket variációanalízis (ANOVA) és válaszfelületi módszer (RSM) segítségével elemezték ki. Az eredmények azt mutatták, hogy a fordulatszám és a szerszámhőmérséklet növelésével nő, míg az előtolási sebesség növelésével csökken a varrat szakítószilárdsága. A legjobb hegesztési hatékonyságot (az alapanyag szakítószilárdságának 88%-át) 1600 1/perc fordulatszámánál, 20 mm/perc előtolási sebességnél és 100 °C-os szerszámhőmérsékletnél érték el.

Sadeghian és Givi [13] 8 mm vastag ABS-lemezek kavaró dörzshegesztését tanulmányozták, hengeres és kúpos csapeometriájú szerszámok alkalmazása mellett. A váll álló kialakítású volt, de nem fűtött. A bemenő paraméterek közül három szinten változtatták a fordulatszámot, az előtolási sebességet, a szerszám dőlésszögét, valamint a váll- és csapátmérőt és ezen átmérők arányát. A kimenő paraméterek itt is a varrat szakítószilárdsága és a kötési hatékonyság volt. A mérési eredményeikből a szerzők azt a következtetést vonták le, hogy a kúpos csapeometria, a nagyobb szerszámdőlésszög és átmérőarány, valamint a kis előtolási sebesség javítja a szakítószilárdságot.

Mendes és tsi. [14] robotrendszer segítségével tanulmányozták az ABS kavaró dörzshegesztését. Tanulmányukban fűtött, álló váll kialakítású szerszámot alkalmaztak. A vizsgált hegesztési paraméterek a fordulatszám, az előtolási sebesség, valamint az axiális erők voltak. A hegesztés után vizsgálták a varrat szilárdságát és keménységét. Eredményeik azt mutatták, hogy a robottal végzett kavaró dörzshegesztéssel jó minőségű varratokat lehet elérni. Következtetésük szerint a nagy axiális erő elősegíti az ömledék állapotban lévő polimer összenyomódását, a fordulatszám pedig a hőtermelésért felelős, amit növelve javul a varrat szilárdsága.

Az eltérő polimerek egymással történő hegesztésének vizsgálata is egyre népszerűbb kutatási téma napjainkban [15].

Gao és társai [16] ABS és nagy sűrűségű polietilén- (HDPE) lemezek kavaró dörzshegesztéssel történő hegeszthetőségét vizsgálták. A szerzők ezen a két anyagon kívül szén nanocsöveket ve-

zettek be a kötésbe, hogy ezzel is erősítsék a varrat szilárdságát. A tanulmányban a hegesztett lemezek vastagsága 4 mm volt, a hegesztés során a két anyagot egymással átlapolva helyezték el, ahol az alsó anyag mindig az ABS volt. Az alkalmazott szerszám csapja kúpos menetes volt. A bemenő paraméterek a fordulatszám, az előtolási sebesség és a szerszámmerülési (hegesztési) mélység volt. Ezeket a paramétereket 3-3 szinten változtatták. Munkájukban a folyamatparaméterek változásának hatását elemezték a varrat szilárdságára és mikroszerkezetére. Mérési eredményeik alapján a legjobb varrat-szakítószilárdságot (14,7 MPa) 30 mm/perc előtolási sebességgel, 2500 1/perc fordulatszámmal és 0,2 mm merülési mélységgel érték el. Ezen kívül kiemelik, hogy a kisebb előtolási sebesség növeli a keverési időt, ami így jobb keveredést biztosít a hegesztési zónában, míg a fordulatszám növelése több hőt eredményez.

Hajideh és ts. [17] szintén ABS és polipropilén (PP) kavaráó dörzshegesztését vizsgálták. Egyes mérési pontoknál a hegesztési zónába rézport vezettek be, hogy vizsgálják annak a varrat szilárdságára és keménységére gyakorolt hatását. Az alkalmazott szerszám fűtött, álló vállal és menetes csappal rendelkezett. A rézpor alkalmazása mellett a bemeneti paramétereket (fordulatszám, előtolási sebesség és szerszámhőmérséklet) három szinten változtatták. Teljes kísérlettervet alkalmaztak. A vizsgált kimeneti paraméter a varrat szilárdsága és keménysége volt. Az eredmények azt mutatták, hogy a rézpor jelentősen növeli a varrat szilárdságát és keménységét.

Jelen tanulmányban 4 mm vastag ABS-lemezek kavaráó dörzshegesztését tanulmányozzuk. A bemeneti paraméterek függvényében vizsgáljuk a hegesztési folyamat során fellépő erőkomponenseket, illetve a varratok szilárdságát.

2. Anyag és módszertan

A vizsgálatok során 4 mm vastag DOCA-ABS R (Quattroplast Kft., Budapest, Magyarország) lemezeket hegesztettünk össze. Annak érdekében, hogy az összehegesztett próbatestekből legalább három szabványos szakítópróbatestet ki tudjunk vágni, a próbadarabok befoglaló méreteit 90×85 mm-re határoztuk meg. A próbatestek kivágását és számozását a 2. ábra mutatja.

A hegesztési kísérleteket MAZAK Nexus VCN 410A-II típusú CNC marógépen végeztük el. A hegesztés során fellépő erőkomponenseket (F_x , F_y , F_z – 1. ábra) pedig a gépsatu alá befogott, Kistler 9257B típusú, piezoelektromos elven működő



2. ábra. Hegesztési próbatestek kivágása és számozása (méretek mm-ben)

erőmérővel mértük. Az erőmérő mérési tartománya $F_x = F_y = -5/+5$ kN és $F_z = 5-10$ kN [18].

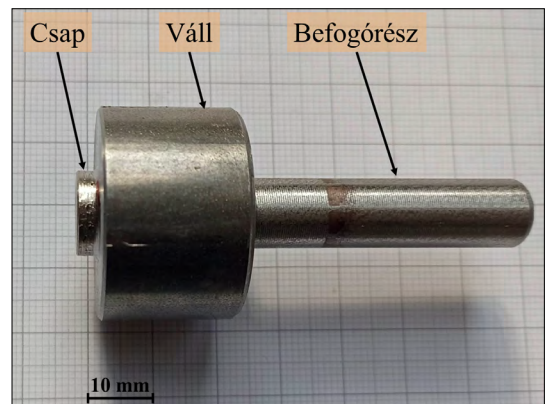
A három mért erőkomponens segítségével a hegesztéskor fellépő eredő erőt számoltuk az alábbi módon:

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

A mérési pontonként három darab szakítópróbatest szakítóvizsgálatát Zwick Z005 szakítógépen hajtottuk végre, 10 mm/perc keresztfejsebesség mellett. A varratok szilárdsága mellett az alapanyag szakítószilárdságát is három mérés alapján határoztuk meg (29 MPa). A hegesztési hatékonyság meghatározása során ezt az értéket vettük figyelembe, a hegesztési hatékonyságot az alábbi módon határoztuk meg:

$$JE = \frac{\sigma_{\max, \text{hegesztett_próbatest}}}{\sigma_{\text{alapanyag}}} \quad (2)$$

A hegesztési vizsgálatok során alkalmazott szerszám csapeometriája henger volt. A csap átmérője 12 mm, míg a váll átmérője 29 mm, a szerszám anyaga pedig C45 acél. Az alkalmazott hegesztőszerszám a 3. ábrán látható.



3. ábra. A kísérletek során használt hegesztőszerszám

A hegesztési paraméterek közül kettőt, a szerzám fordulatszámát és az előtolási sebességet változtattuk 3-3 szinten. Az alkalmazott paramétereket előkísérletek alapján határoztuk meg, melyek az **1. táblázat**ban láthatóak.

A vizsgálatok során teljes kísérlettervet alkalmaztunk. A mérési pontokat és a hozzájuk tartozó hegesztési paramétereket a **2. táblázat** ismerteti. A táblázatban továbbá fel van tüntetve az egyes mérési pontokhoz tartozó n/v_f arányszám értéke. Az eredmények értékelése során ennek a paraméternek a függvényében is vizsgáltuk az eredményeket.

3. Eredmények

3.1. Az erőadatok elemzése

A **4. ábrán** látható, hogyan alakulnak a hegesztés során fellépő erőkomponensek (F_x , F_y , F_z). Jól megfigyelhető, hogy a hegesztés során nem lép fel jelentős oldalirányú erő (F_x), az előtolás irányú erő (F_y) és az axiális irányú erő (F_z) értékek dominálnak. Az utóbbi erőkomponensnél két jelentős szakaszra lehet osztani az erőképet: egy felfutási szakaszra, ahol a szerzám hegesztési zónába történő belépése következtében hirtelen megugrik az erő, illetve az ezt követő, közel állandósult szakaszra. Ez az előtolás irányú erő (F_y) esetén nem figyelhető meg, az a hegesztés folyamán mindig közel állandó értéken marad.

Az erőértékek kiértékelése során mindig az állandósult szakaszon mért átlag erőértéket értékeltük ki.

3.2. Erőtani vizsgálatok eredményei

Az erőtani elemzések során az előtolás irányú erő (F_y), az axiális irányú erőkomponensek (F_z), valamint az eredő hegesztési erő (F_e) vizsgálatát végeztük el. Az **5. ábra** az F_y irányú erő hatását mutatja a hegesztési paraméterek függvényében. Jól megfigyelhető, hogy a fordulatszám növelésével az erőértékek csökkennek, míg az előtolási sebesség növelésével növekednek. Ezen kívül a n/v_f arányszám növelésével megfigyelhető az erőérték csökkenése.

A **6. ábrán** láthatóak az F_z irányú erőhöz tartozó főhatásábrák, a hegesztési paraméterek függvényében. Hasonló tendenciák figyelhetők meg ebben az esetben is. A fordulatszám és az n/v_f arányszám növelésével csökken az erőkomponens értéke, míg az előtolási sebesség növelésével növekszik.

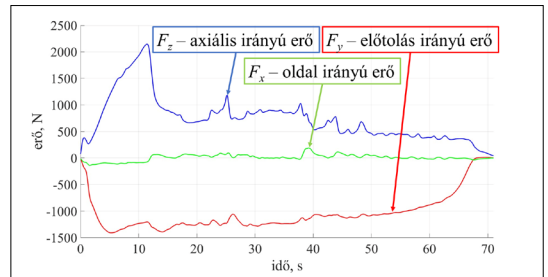
Végezetül a **7. ábrán** láthatók az eredő erő (F_e) főhatásábrái. Mivel ez az érték az előbb bemuta-

1. táblázat. A hegesztési paraméterek értékei

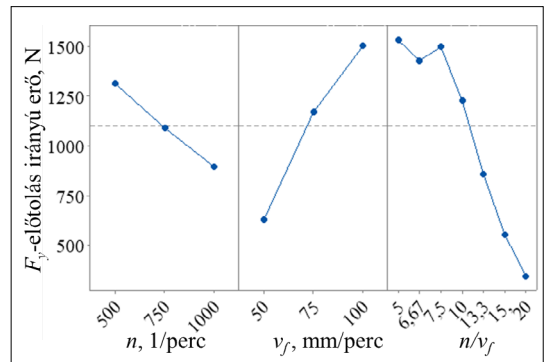
Paraméterek		Szintek		
		-1	0	1
x_1	fordulatszám – n , 1/perc	500	750	1000
x_2	előtolási sebesség – v_f , mm/perc	50	75	100

2. táblázat. A mérési pontok és a hozzá tartozó hegesztési paraméterek

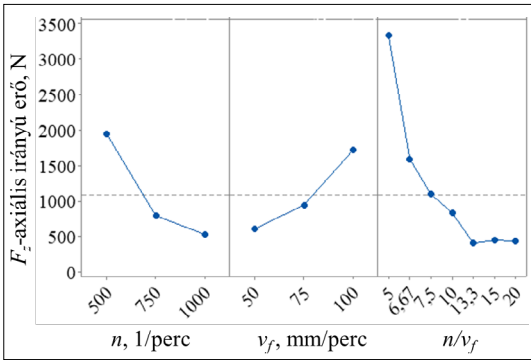
Mérési pont	n (1/perc)	v_f (mm/perc)	n/v_f
1	500	50	10
2	500	75	6,67
3	500	100	5
4	750	50	15
5	750	75	10
6	750	100	7,5
7	1000	50	20
8	1000	75	13,3
9	1000	100	10



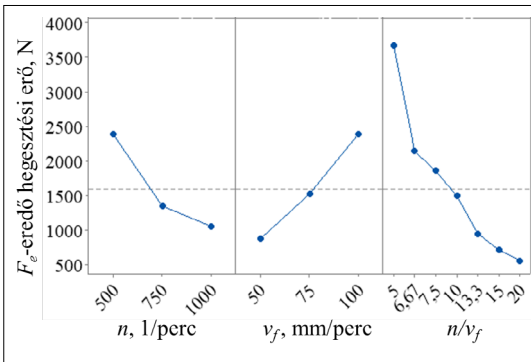
4. ábra. Az erőkomponensek alakulása a hegesztés során



5. ábra. A hegesztési paraméterek hatása az előtolás irányú erőre (F_y)



6. ábra. A hegesztési paraméterek hatása az axiális irányú erőre (F_z)



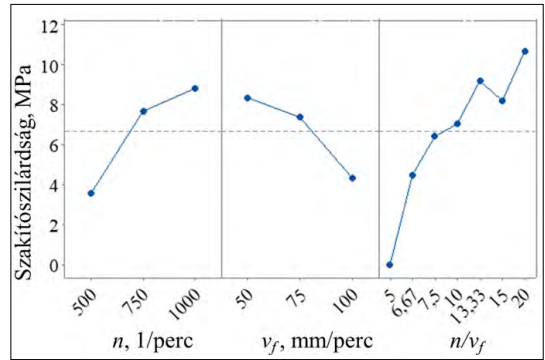
7. ábra. A hegesztési paraméterek hatása az eredő hegesztési erőre (F_e)

tott két erőértékből és az oldalirányú erőkomponensből származik, a tendenciák itt is hasonlóan alakulnak, mint a 6. ábrán. A fordulatszám és n/v_f arányszám növelésével csökken az eredő hegesztési erő, míg az előtolási sebesség növelésével növekszik.

A domináns erőértékek és az eredő hegesztési erő változása az egyes hegesztési paraméterek függvényében arra enged következtetni, hogy a fordulatszám növelésével nő a hegesztési zónában a hőmérséklet, aminek a hatására a polimer ömledék állapotba kerül, így kisebb erőértékek ébrednek a hegesztés során. Az előtolási sebesség a hegesztési idővel hozható párhuzamba: minél nagyobb ez a hegesztési paraméter, annál kisebb ideig tartózkodik a szerszám a hegesztési zónában, így kevesebb ideje van az anyag megfelelő megömlésztésére, és így nőnek a hegesztés során fellépő erők.

3.3. A szilárdsági vizsgálatok eredményei

A másik kimeneti érték a varratok szakítószilárdsága. Minden mérési pontban három mérést végeztünk, és a három kapott eredmény ér-



8. ábra. A hegesztési paraméterek hatása a varrat szilárdságára

tékének az átlagát elemeztük. A varratok szakítószilárdságának főhatásábrái a 8. ábrán láthatók.

Látható, hogy a fordulatszám és az n/v_f arányszám növelésével a varrat szilárdsága javuló tendenciát mutat. Túl kis n/v_f arányszám (3. mérési pont, $n/v_f = 5$) esetén nem jött létre a két lemez között értékelhető kötés. Az előtolási sebesség növelése a varrat szilárdságának a romlását eredményezi. A legjobb varratszilárdságot (10,69 MPa) a 7. mérési pontban kaptuk, 1000 1/perc fordulatszámra és 50 mm/perc előtolási sebesség mellett.

4. Következtetések

Jelen cikkben 4 mm vastag ABS-lemezek kavarró dörzshegesztési vizsgálatát végeztük el hagyományos kialakítású szerszámmal. A kísérletek során 3-3 szinten változtattuk a szerszám fordulatszámát és az előtolási sebességet. A kísérletek kiértékelésekor elemeztük a hegesztési paraméterek hatását a folyamat során fellépő erőértékekre és a varrat szilárdságára. A vizsgálatok alapján az alábbi következtetések vonhatóak le:

- A hegesztés során fellépő erőértékek közül az előtolási irányú erőérték (F_y) és az axiális irányú erő (F_z) értékek a dominánsak.
- A fordulatszám (n) és az n/v_f arányszám értékének növelésével a hegesztési folyamat során fellépő előtolási irányú (F_y), axiális irányú (F_z) és eredő hegesztési erő (F_e) értékek csökkennek, míg a varrat szilárdsága javul.
- Az előtolási sebesség (v_f) értékének növelésével a hegesztési folyamat során fellépő előtolási irányú (F_y), axiális irányú (F_z) és eredő hegesztési erő (F_e), értékek növekednek, míg a varrat szilárdsága romlik.
- A legjobb varratszilárdságot (10,69 MPa) 1000 1/perc fordulatszám és 50 mm/perc előtolási sebesség mellett érték el. Ez az alapanyag szakítószilárdságának 37%-a.

Köszönetnyilvánítás

Jelen cikk az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-22-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Thomas W. M., Nicholas E. D., Needhan J. C., Murch M. G., Temple-Smith P., Dawes C. J.: *Friction-stir butt welding*. “International patent application PCT/GB92/02203 and GB patent application 9125978.8.”. UK Patent Office, London 6. 1991.
- [2] Kovács Zs., Hareancz F.: *Joining of non-weldable AA7075 and weldable AA6082 aluminium alloy sheets by friction stir welding*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 448/1. (2018) 012001.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012001>
- [3] Çam G.: *Friction stir welded structural materials: beyond Al-alloys*. International Materials Reviews, 56/1. (2011) 1–48.
<https://doi.org/10.1179/095066010X12777205875750>
- [4] Salih O. S., Ou H., Sun W., McCartney D. G.: *A review of friction stir welding of aluminium matrix composites*. Materials & Design, 86. (2015) 61–71.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.071>
- [5] Singh K., Singh G., Singh H.: *Review on friction stir welding of magnesium alloys*. Journal of magnesium and alloys, 6/4. (2018) 399–416.
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.06.001>
- [6] Gangwar K., Ramulu M.: *Friction stir welding of titanium alloys: a review*. Materials & Design, 141. (2018) 230–255.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.033>
- [7] Rao A. N., Naik L. S., Srinivas C.: *Evaluation and impacts of tool profile and rotational speed on mechanical properties of friction stir welded copper 2200 alloy*. Materials Today: Proceedings, 4/2. (2017) 1225–1229.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.141>
- [8] Huang Y., Meng X., Xie Y., Wan L., Lv Z., Cao J., Feng J.: *Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 105. (2018) 235–257.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.12.005>
- [9] Czigány T., Kiss Z.: *Friction stir welding of fiber reinforced polymer composites*. In: Proceedings of the 18th International Conference on Composite Materials, Jeju, South Korea, 2011. 21–26.
- [10] Gibson B. T., Lammlein D. H., Prater T. J., Longhurst W. R., Cox C. D., Ballun M. C., Dharmaraj K. J., Cook G. E., Strauss A. M.: *Friction stir welding: Process, automation, and control*. Journal of Manufacturing Processes, 16/1. (2014) 56–73.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.04.002>
- [11] Arif M., Kumar D., Siddiquee A. N.: *Friction stir welding and friction stir spot welding of acrylonitrile butadiene styrene: A review*. Materials Today: Proceedings, 62/1. (2022) 300–308.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.269>
- [12] Bagheri A., Azdast T., Doniavi A.: *An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets*. Materials & Design, 43. (2013) 402–409.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.059>
- [13] Sadeghian N., Givi M. K. B.: *Experimental optimization of the mechanical properties of friction stir welded Acrylonitrile Butadiene Styrene sheets*. Materials & design, 67. (2015) 145–153.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.032>
- [14] Mendes N., Loureiro A., Martins C., Neto P., Pires J. N.: *Morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene welds performed by robotic friction stir welding*. Materials & Design, 64. (2014) 81–90.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.047>
- [15] Rudrapati R.: *Effects of welding process conditions on friction stir welding of polymer composites: A review*. Composites Part C: Open Access, 8. (2022) 100269.
<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100269>
- [16] Gao J., Li C., Shilpakar U., Shen Y.: *Microstructure and tensile properties of dissimilar submerged friction stir welds between HDPE and ABS sheets*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87. (2016) 919–927.
<https://doi.org/10.1007/s00170-016-8539-y>
- [17] Hajideh M. R., Farahani M., Ramezani N. M.: *Reinforced dissimilar friction stir weld of polypropylene to acrylonitrile butadiene styrene with copper nanopowder*. Journal of Manufacturing Processes, 32. (2018) 445–454.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.010>
- [18] KISTLER Multicomponent Dynamometer 9257b datasheet, 2009, Kistler Group



Üvegszál-erősítésű, lapos profilok ragasztott kötéseinek vizsgálata

Investigation of Bonded Joints in Glass Fiber Reinforced Flat Profiles

Szabó Valentin,¹ Vaczkó Dániel²

¹ Neumann János Egyetem, GAMF kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország, szabo.valentin@gamf.uni-neumann.hu

² Neumann János Egyetem, GAMF kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország, vaczko.daniel@gamf.uni-neumann.hu

Abstract

Nowadays, raw material shortage is a characteristic problem that affects every sector of the industry. Composite materials reinforced with fiberglass, manufactured through the pultrusion process, have extremely favorable properties. In our research, we examined the application of surface treatments on pultruded profiles to enhance surface energy. We roughened the surfaces to be bonded using manual sanding and sandblasting techniques, and then performed wetting measurements using various degreasing agents. To demonstrate the occurrence of surface treatment and determine its magnitude, we inspected the surfaces with a roughness tester. The bonds were created using two different structural adhesives as well as epoxy resin. The shear strength values of the flat profiles were compared through tensile tests, and the effects of the surface treatments were determined. Based on the results, the appropriate surface treatment and adhesive type greatly influence the developed bond strength.

Keywords: *bonding, pultrusion, composite, surface energy, glass fibre.*

Összefoglalás

Napjainkban a nyersanyaghiány egy jellegzetes probléma, amely az ipar minden területén jelentkezik. A pultrúziós eljárással gyártott, üvegszál-erősítésű kompozitok rendkívül kedvező tulajdonságokkal rendelkeznek. A kutatás során pultrudált profilokon felületkezelések alkalmazását vizsgáltuk a felületi energia növelése érdekében. Kézi csiszolással és homokszórással érdesítettük a ragasztani kívánt felületeket, majd különböző zsírtalanítószereket alkalmazva nedvesíthetőségi méréseket végeztünk el. A felületkezelés létrejöttének bizonyítására és nagyságának a meghatározására a felületeket érdességmérővel ellenőriztük. A ragasztásokat két különböző szerkezeti ragasztóval, valamint epoxi gyantával készítettük el. A lapos profilok nyírószilárdsági értékét szakítóvizsgálaton hasonlítottuk össze, majd meghatároztuk a felületkezelések hatását. Az eredmények alapján a megfelelő felületkezelés, illetve a ragasztó típusa nagymértékben befolyásolja a kialakult kötésszilárdságot.

Kulcsszavak: *ragasztás, pultrúzió, kompozit, felületi energia, üvegszál.*

1. GFRP-profilok

A pultrúzióval előállított, üvegszál-erősítésű profilok (glass fiber reinforced plastic, GFRP) kompozit anyagok. A pultrúzió egy gyártási eljárás, amelyet folytonossal-erősítésű, polimermát-

rixú kompozitok előállítására használnak. A pultrúzió során a szálakat és a gyantát általában egy melegített szerszámon húzzák át, ahol a gyanta megkeményedik és szilárd alakot ölt.

A pultrúziós folyamat lehetővé teszi a nagy szilárdságú, könnyű és tartós kompozit alkatrészek

és szerkezeti elemek gyártását. Ez az eljárás egyre népszerűbb az építőiparban, az autóiparban, az elektromosiparban és más iparágakban, amelyek olyan erős, könnyű és tartós anyagokra támaszkodnak, amelyek ellenállnak a korrózióknak és a vegyi anyagoknak. A pultrúzió egyik fő előnye abban rejlik, hogy lehetővé teszi összetett alakzatok egyenletes méretekké és nagy pontossággal történő gyártását, ami miatt egyre többen választják ezt az eljárást a szerkezeti elemek gyártásához. A pultrudált anyagok jó korrózió- és vegyszerállósággal rendelkeznek. A kis tömeg mellett a szerkezeti elemeknek nagy a mechanikai szilárdságuk, ami nagy stabilitást és megbízhatóságot biztosít számukra [1].

A pultrudált profilok felületi energiája kicsi, ennek oka a gyártástechnológia során alkalmazott felületkezelés. Ennek eredményeként az ilyen alkatrészek ragasztása kihívást jelenthet. Megfelelő felületkezeléseket alkalmazva növelhető a felületi energia és a ragasztott felület nagysága is, ezáltal nagymértékben javítható a kötés [2].

Kutatásunkban kézi csiszolással és homokszórással kezeljük a felületeket, majd különböző zsírtalanítószereket alkalmazva tisztítjuk őket. A kezelések hatásait nedvesíthetőségi és felületi érdesség-méréssel vizsgáljuk, majd szakítógép segítségével a ragasztott kötés nyírószilárdságát határozzuk meg.

A próbatétel és a ragasztott felület hosszának az aránya 4:1-hez. A befogási hossz alapján is ezt az arányt alkalmaztuk, így elegendő távolságra van a ragasztott felület a befogási ponttól. A lapos profilok 6 mm vastagságúak, 50 mm szélességűek és 100 mm hosszúak. A ragasztási és a befogási hossz 25-25 mm. A ragasztott felület 1250 mm² nagyságú. A lapos profilhoz szükséges kísérlettervet az 1. táblázat tartalmazza. Minden próbatételstípusból három szakítást végeztünk. A próbatétel jelölései az alábbi táblázatban láthatók, ahol a zárójelben lévő adott típusú próbatételben belüli szakítási számok vannak feltüntetve.

1. táblázat. A kísérletek során alkalmazott jelölések

Felületkezelések típusa	Ragasztótípusok		
	Loctite HY4090	Sikapower 4720	IpoX MR 3010 gyanta
Kezeletlen	Lo_S_(1-3)	S_S_(1-3)	Gy_S_(1-3)
Homokszórt	Lo_H_(1-3)	S_H_(1-3)	Gy_H_(1-3)
Csiszolt	Lo_Cs_(1-3)	S_Cs_(1-3)	Gy_Cs_(1-3)

2. Határfelület-vizsgálat

A kötésszilárdság egyik alapvető eleme, hogy a ragasztóanyag képes legyen megfelelően nedvesíteni a ragasztandó anyagot. A nedvesítőképességet meg tudjuk határozni egy szilárd felületre helyezett folyadék szétterülésével. A peremszög (θ) mint mérőszám a három fázis érintkezési pontjában kialakuló érintkezési szög. A peremszöget kezeletlen, kézi csiszolással kezelt és homokszórt felületen vizsgáltuk. Stazi, F., Giampaoli, M., Rossi, M., & Munafò, P. kutatásukban [3] a kézi csiszolásos és a homokszórásos felületen jobb eredményeket értek el a kezelés nélküli felülethez képest. Ezért a próbatétel felületét hagyományos kézi csiszolással, P80-as csiszolópapírral érdesítettük.

2.1. Érdességvizsgálat

Két típusú felületi érdesítést alkalmaztunk a próbatételeken: az érdesítés nélküli mellett homokszórás és kézi csiszolás. Ahhoz, hogy a felületi érdességet meg tudjuk mérni, az érdesített felületeken érdességvizsgálatot végeztünk el. Az általunk mért érdesség csupán a felületek közötti különbségek meghatározására szolgál.

A felületeket Mitutoyo Formtracer SV-C3100-as gépen vizsgáltuk meg. Az átlagos érdesség (R_a) a kezelés nélküli felülethez képest kétszer akkora a csiszolt és homokszórt felületen. A 2. táblázat az átlagolt értékek eredményét mutatja.

A felületen létrejövő egyenetlenség-magasság (R_z) is számottevően megnőtt a felületkezelések által, hiszen a kezelés nélküli felülethez képest valamivel több mint 2,5-szeresére növekedett ez az érték. A maximális egyenetlenség-magasság (R_t) átlagánál a sima felület értékének közel háromszorosa a csiszolt és a homokszórt felület értéke.

2.2. Nedvesítési vizsgálat

A peremszöget videokamera segítségével rögzítettük. A cseppeket Accumax Pro pipetta segítségével helyeztük a felületekre. Szondafolyadék-ként desztillált vizet alkalmaztunk. Méréseink száma a felülettípus és a tisztítószerek számának

2. táblázat. Az érdességvizsgálaton kapott eredmények kiértékelése

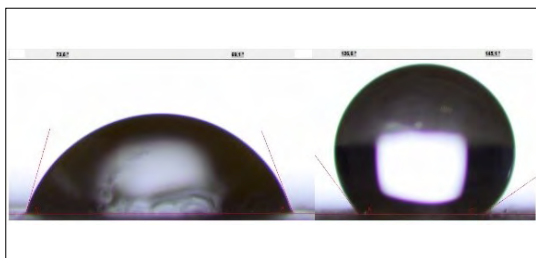
	Kezeletlen	Csiszolt	Homokszórt
R_a (μm)	1,77	3,72	3,73
R_z (μm)	8,38	21,51	22,20
R_t (μm)	11,22	31,73	33,63

(itt egy kezelés nélkülivel is számolni kell) szorzata, tehát 12 mérést készítettünk, mérésenként 3 cseppet használva. A bal és a jobb oldali érintkezési szöget pedig képelemzéssel számítottuk ki. Háromféle felületípust mértünk, a kezelés nélkülit, a homokszórt és a kézzel csiszolt felületet. Zsírtalanítás szempontjából négy tisztítási típust alkalmaztunk. Elsősorban egy zsírtalanítás nélküli felületet vizsgáltunk meg, hogy legyen mihez viszonyítani a különböző zsírtalanító folyadékokat. Kétféle zsírtalanítószer alkalmaztunk: acetont és Loctite Super Cleaner tisztítósprayt, illetve egy alkoholt, metanolt [4].

A mérések által kapott két szélsőérték képei láthatók az 1. ábrán, ahol a legjobban elterült csepp a sima felületen történt zsírtalanítás nélkül, a másik képen pedig a legkevésbé elterült csepp látható csiszolt felületen zsírtalanítás nélkül.

Az eredmények között nagy eltérések vannak. A legjobban nedvesíthető felület a felületkezelés és zsírtalanítás nélküli felület. Megfigyeltük, hogy a kezeletlen felület a Loctite Super Cleaner tisztítóspray alkalmazásával a többi tisztítófelülethez képest jobb eredményt mutatott, de még így sem jobbat azon felületnél, amelyiket zsírtalanítás nélkül vizsgáltunk. A kézzel csiszolt és a homokszórt felületeknél egyértelműen a metanollal való zsírtalanítás volt a leghatékonyabb, mivel a kézzel csiszolt felületnél az átlag peremszög $94,18^\circ$, a homokszórtól pedig $94,25^\circ$ -os eredményt adott. Az érdesített felületeknél megfigyeltük, hogy az aceton nagyjából $8-9^\circ$ szögeltéréssel mutatott nagyobb értékeket a metanolhoz képest.

A mért eredmények alapján a kezelés és a zsírtalanítás nélküli felület nedvesíthetőségi képessége érte el a részleges nedvesíthetőségi tartományt, aminek a peremszög értéke 90° alatti volt. A felhasznált ragasztók elterülése viszkozitástól függő, ezért célszerű lesz beavatkozni. Vannak ragasztógyártók, akik előírják a használati utasításban a ragasztó elterítését/elkenését, például műanyag kenőlappal.



1. ábra. A legjobban (bal) és a legkevésbé (jobb) elterült csepp a mérések során

3. Mérések és vizsgálati eredmények

A mérések során különböző felületi érdességeket hasonlítottunk össze úgy, hogy a felületeket összeragasztottuk, minden próbatestenél a ragasztott felület 1250mm^2 , majd szakítóvizsgálatot végeztünk. A legjobban sikerült méréseket megismételtük két- és háromszoros méretű próbatestekkel, ezzel megvizsgálva azt, hogy lineárisan növekvő értékeket kapunk-e.

A méréseket Instron 5900R 4482-es szakítógépen végeztük el. Minden mérési típus esetén három szakítóvizsgálat történt. A ragasztók teljesítménye nyírószilárdság szempontjából a Loctite-nál (acél próbatesten) 17N/mm^2 , a Sikapowernél 14N/mm^2 , a gyantánál viszont nincs gyári érték a nyírószilárdságra.

A kezeletlen felületű próbatesteken mért maximális terhelés 5000N alatt maradt. A Loctite-nál három szakításból kettőnél közel azonos értéket kaptunk ($3113,1\text{N}$ és $3118,3\text{N}$), míg a harmadik értéknél nagyjából 800N -al lett kevesebb. A Sikapower által kapott eredményeknek nagyobb a szórása, mivel a legkisebb eredmény $3097,3\text{N}$, a legnagyobb pedig $4958,9\text{N}$. A gyanta a legkisebb szórást eredményezte, így ennél $2570,3\text{N}$ és $3221,5\text{N}$ közötti értékeket kaptunk. Meghibásodás szempontjából a ragasztó minden esetben teljes felületen felvált a ragasztott felületről. A 3. táblázatban a kezeletlen felületeknél kapott eredmények értékei és a meghibásodások típusai láthatóak.

A csiszolt felületeknél kapott eredmények egyévesen mind kisebb értékeket mutattak a homokszórt felületekhez képest, de a kezeletlen felületekhez viszonyítva dupla akkora terhelési ellenállást mutattak. A 4. táblázatban láthatóak a mérési eredmények. A kezeletlen felülethez képest kétszer akkora terhelést viseltek el, de még így teljes leválás volt tapasztalható. A terhelések értékei kétszeresére növekedtek a kezeletlen felületekhez képest, de a meghibásodás jellege nem mutatott különbséget.

3. táblázat. Sima felületen kapott eredmények

Próbatest-jelölés	Maximális terhelés átlaga (N)	Nyírószilárdság (N/mm^2)	Meghibásodás jellege
Gyanta-kezeletlen	2907,9	2,33	Felvált, teljes felületen
Loctite-kezeletlen	2841,9	2,27	Felvált, teljes felületen
Sikapower-kezeletlen	4896,7	3,92	Felvált, teljes felületen

4. táblázat. Csiszolt felületeken kapott eredmények

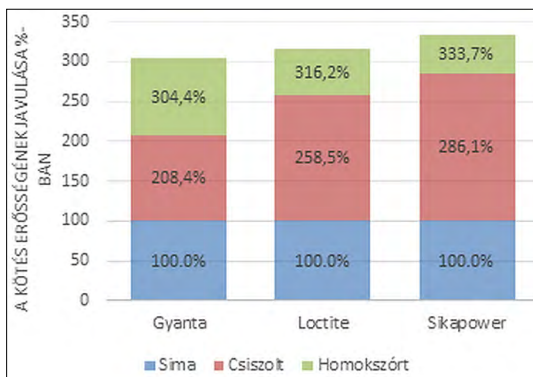
Próbatest-jelölés	Maximális terhelés átlaga (N)	Nyírószilárdság (N/mm ²)	Meghibásodás jellege
Gyanta-Csiszolt	6060,7	4,85	Felvált, teljes felületen
Loctite-Csiszolt	7345,7	5,88	Felvált, teljes felületen
Sikapower-Csiszolt	9115,1	7,29	Felvált, teljes felületen

5. táblázat. Homokszórt felületeken kapott eredmények

Próbatest jelölés	Maximális terhelés átlaga (N)	Nyírószilárdság (N/mm ²)	Meghibásodás jellege
Gyanta-Homoksz.	8851,4	7,08	Részlegesen felvált
Loctite-Homoksz.	8987,2	7,19	Felvált, teljes felületen
Sikapower-Homoksz.	16339	13,07	Részlegesen felvált



2. ábra. A részlegesen felvált ragasztott kötés a homokszórt profilon Sikapower ragasztóval



3. ábra. Felületkezelések hatása a sima felülethez képest

A homokszórt felületek az előzőnél jobb eredményeket hoztak, mivel sima felülethez képest mind a három ragasztás legalább háromszoros értékre növekedett. A Loctite ragasztóval és a gyantával készült kötések hasonló értékeket mutattak. A Sikapowerrel készült kötés önmagához képest is jó kötést eredményezett, hiszen nemcsak több mint a háromszorosát mutatta a sima felületi ragasztáshoz képest, de még a gyártó által megadott maximális nyírószilárdsági értéket is 93%-ban teljesítette. Az 5. táblázatban a homokszórt felületeknél kapott eredmények értékei és a meghibásodások típusai láthatóak.

A Sikapower ragasztóval összeragasztott próbatesteknél jelentős javulást tapasztaltunk a ragasztott kötés minőségében. Az összeragasztott kötés mellett a pultrudált profilban jött létre a szakadás, amit a 2. ábra is szemléltet.

Az adhéziós és kohéziós meghibásodások aránya nagyjából 60–40% volt. Gyantás ragasztásnál minimálisan, de megjelent a kohéziós hibajelenség. A sima felületekhez képest a homokszórt felületek összességében több mint háromszoros nyírófeszültségi értékeket adtak, ami arányosan mind a három ragasztóval készült kötésre igaz. A Sikapower a gyári nyírófeszültséget szinte teljesítette, hiszen ennek a 93%-át mértük a próbatesteken átlagosan.

A 3. ábrán az látszik, hogy a homokszórással kezelt felületek eredményezték a legerősebb kötéset. A szakadás során adhéziós és kohéziós hibák jelentkeztek a homokszórással érdesített felületen. A lapos profilok szakításánál a legnagyobb eredményt a Sikapower és a homokszórt felületérdesítés kombinációja eredményezte, ezért ezzel a kombinációval további vizsgálatot végeztünk. A következő vizsgálat során növeltük az érdesítési felületeket, majd azt vizsgáltuk meg, hogy a nyíróerők hogyan követik ezt a változtatást.

4. Következtetések

A ragasztástechnológia hatékonyságát leginkább a megfelelően előkészített felület befolyásolja. Esetünkben a kicsi felületi energiájú határfelület egyszerű felületkezelési, érdesítési eljárások alkalmazásával eltávolítottuk, ezzel megnöveltük a felületi energiát és a ragasztási terület nagyságát is. Ezzel a ragasztás számára előnyös felület alakult ki. Ezáltal a homokszórással kezelt próbatestek mind a három típusú ragasztóanyagnál 300% feletti javulást mutattak a kezeletlen felülethez képest. A Sikapowerrel ragasztott homokszórással kezelt felületek teljesítették a legjobban.

Ennek két oka lehet, az egyik az, hogy a homokszórással homogénebb felületi érdesség-eloszlás hozható létre, ami egyenletesebb kötést eredményez. A másik lehetséges ok az, hogy a Sikapower ragasztó tartalmaz 0,25 mm-es távtartó üveggyöngyöket, amelyek a ragasztás során biztosítják az optimális ragasztási hézagot. Így a ragasztott kötés kialakítása során a megfelelő hézag szinte biztosított.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott kutatás a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00052. számú pályázat támogatásával jött létre. A projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által meghirdetett pályázat keretében valósult meg.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Encinas N., Lavat-Gil M., Dillingham R. G., Abenajar J., Martínez M. A.: *Cold plasma effect on short*

glass fibre reinforced composites adhesion properties. International Journal of Adhesion and Adhesives, 48. (2014) 85–91.

<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.09.026>

[2] Volk M., Yuksel O., Baran I., Hattel J. H., Spangenberg J., Sandberg M.: *Cost-efficient, automated, and sustainable composite profile manufacture: A review of the state of the art, innovations, and future of pultrusion technologies*. Composites Part B: Engineering, 246. (2022) 110135.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110135>

[3] Stazi F., Giampaoli M., Rossi M., Munafò P.: *Environmental ageing on GFRP pultruded joints: comparison between different adhesives*. Composite Structures, 133. (2015) 404–414.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.067>

[4] Berczeli M., Weltsch Z.: *Enhanced wetting and adhesive properties by atmospheric pressure plasma surface treatment methods and investigation processes on the influencing parameters on HIPS polymer*. Polymers, 13/6. (2021) 901.

<https://doi.org/10.3390/polym13060901>