

ACTA MATERIALIA TRANSYLVANICA

Anyagtudományi Közlemények

9. évfolyam, 2026. 1. szám



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET
Kolozsvár
2026

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 EME – Department of Engineering Sciences.



Főszerkesztő / Editor-in-Chief: Bitay Enikő

Nemzetközi Tanácsadó testület / International Editorial Advisory Board:

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

Lapszámszerkesztők / Editorial Board:

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

Kiadó / Publisher: Erdélyi Múzeum-Egyesület

Felélős kiadó / Responsible publisher: Biró Annamária

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

Borítótér / Cover: Kőnczey Elemér

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

Copyright © a szerzők / the authors, EME/ TMS 2026

ISSN 2601-1883, ISSN-L 2601-1883

DOI: 10.33923/amt-2026-01

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

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

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

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

BIRÓ LEVENTE, MIHÁLY NORBERT-BOTOND, CORMOȘ ANA-MARIA	1
<i>Egy kombinált kalcium-réz rendszer modellezése az integrált szén-dioxid-elkülönítés és a tisztaenergia-előállítás céljából</i>	
<i>Modelling a Combined Calcium-Copper System for Integrated Carbon Dioxide Capture and Clean Energy Production</i>	
BODROGAI LÁSZLÓ ANZELM, SCHRAMKÓ MÁRTON, VARGA BÁLINT	8
<i>Kompozit szendvicspanelek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata</i>	
<i>Examination of the Mechanical Properties of Composite Sandwich Panels</i>	
KÁRI-HORVÁTH ATTILA, LANTOS ZSOLT, BARA ADRIÁN	13
<i>Tengerjáró hajókon alkalmazható, a termikus szárítás elvén működő berendezés keverőtartályának anyagvizsgálata</i>	
<i>Material Testing of the Mixing Tank of Equipment Operating on the Principle of Thermal Drying for Use on Sea-Ship</i>	
KOVÁCS TÜNDE ANNA	20
<i>A robbantásos plattírozás anyagtudományi kérdései</i>	
<i>Materials Science Issues in Explosive Cladding</i>	
MÓNUS LÁSZLÓ JÓZSEF, FÁBIÁN ENIKŐ RÉKA	25
<i>Kombinált erősítésű csigás íjkar hárompontos hajlítása</i>	
<i>Three Point Bending of Hybrid-Reinforced Compound Bows Limbs</i>	
NYÁRY VILMOS, KORSÓS KRISZTIÁN	30
<i>Az alakítási martenzit kimutatása 1.4462 számjelű duplex acélban</i>	
<i>Detection of Deformation-Induced Martensite in 1.4462 Type Duplex Stainless Steel</i>	
OBSITOS PÉTER, TÓTH LÁSZLÓ, KOVÁCS TÜNDE ANNA	34
<i>Járműalkatrész-pótlás additív gyártással</i>	
<i>Automotive Spare Parts Production Via Additive Manufacturing</i>	

SZŐKE FANNI, KÁNNÁR ANTAL	40
<i>A szürke nyár törésképének vizsgálata tartószerkezeti felhasználás céljából</i>	
<i>Fracture Analysis of Grey Poplar for Structural Applications</i>	
TICHOV FRUzsINA, KOVÁCS TÜNDE, KÓNYA JÁNOS, VITANOVICS DUSÁN	47
<i>Koponyaimplantátumok vége-selemes modellezése és mechanikai értékelése</i>	
<i>Finite Element Modeling and Mechanical Analysis of Skull Implants</i>	
VÖRÖS ÁDÁM, LŐRINCZ BALÁZS	57
<i>Különböző belső struktúrájú szubperiosteális implantátumok extrém terhelés alatti vizsgálata</i>	
<i>Extreme Loading Analysis of Subperiosteal Implants with Different Internal Structures</i>	



Egy kombinált kalcium-réz rendszer modellezése az integrált szén-dioxid-elkülönítés és a tisztaenergia-előállítás céljából

Modeling a Combined Calcium-Copper System for Integrated Carbon Dioxide Capture and Clean Energy Production

Biró Levente,¹ Mihály Norbert-Botond,² Cormoș Ana-Maria³

¹ Babeș-Bolyai Tudományegyetem, Kémia és Vegyészmérnöki Kar, Vegyészmérnöki Tanszék, Kolozsvár, Románia, levente.biro@ubbcluj.ro

² Babeș-Bolyai Tudományegyetem, Kémia és Vegyészmérnöki Kar, Vegyészmérnöki Tanszék, Kolozsvár, Románia, norbert.mihaly@ubbcluj.ro

³ Babeș-Bolyai Tudományegyetem, Kémia és Vegyészmérnöki Kar, Vegyészmérnöki Tanszék, Kolozsvár, Románia, ana.cormos@ubbcluj.ro

Abstract

The current increase in greenhouse gas emissions has a significant impact on the global warming rate. This impact requires mitigation and, where possible, a reversal of this trend. A feasible solution to this phenomenon is the development of multiple industrial methods aimed at capturing CO₂ from flue gas emissions that result from chemical processes. Chemical looping is an ideal method for performing carbon capture during blue hydrogen production; however, multiple technological systems are needed for the process to remain profitable. In this paper, the initial steps in model development methodology are presented by the validation of the kinetic parameters. In addition, a short case study was performed to investigate the economic impact of the industrial process for a single operating cycle.

Keywords: *clean energy production, chemical looping, CA-looping, mathematical modeling and validation.*

Összefoglalás

Az üvegházhatású gázok kibocsátási szintjének emelkedése jelentős hatással van a globális felmelegedés ütemére, amelyet mérsékelni kell, és ha lehetséges, vissza kell fordítani. E jelenségre adható és megvalósítható megoldásként számos ipari módszert dolgoztak ki, ilyen például a kémiai folyamatok füstgázából történő CO₂-elkülönítés. A kutatói munka során matematikai modelleket fejlesztettünk ki, és igazoltuk a működésükért felelős kinetikai paramétereket irodalmi forrásokból vett eredményekkel. A megalkotott modell alapján akár 6654 kmol kékhidrogén-gázt lehet előállítani egy működési ciklus alatt, gazdaságosan elszeparálva a reakció során képződő más termékektől, pontosabban a CO₂-tól. A kutatás alatt végzett esettanulmány során azt vizsgáltuk, hogy mekkora mennyiségű energiára van szükség a folyamat bizonyos részegységeinek a működtetésére, és a befektetett energiából pontosan mekkora mennyiség nyerhető vissza.

Kulcsszavak: *Tisztaenergia-gyártás, kémiai körciklus, kalcium-körciklus, matematikai modellezés és ellenőrzés.*

1. Bevezetés

A modern kor legfőbb kihívása a veszélyes betegségek kutatása és ezek kezelése mellett a globális felmelegedés mérséklése, és amennyiben lehetséges, a folyamat visszafordítása. Ez utóbbi probléma jelentős társadalmi hatással bír, mivel a Föld minden lakóját érinti. A globális felmelegedés hatásai egyre láthatóbbá válnak, elsősorban az üvegházhatású gázok (ÜHG) kibocsátásának gyors növekedése miatt. Felismerve ezt a veszélyt, az emberiség különböző klímaegyezményeken keresztül igyekszik megoldást találni a kialakult helyzetre, bevonva a világ kormányait és gazdaságait [1, 2]. A szakirodalomban szereplő legfrissebb adatok szerint a légkörben három fő gázfajta található nagy mennyiségben, amelyek felelősek a globális felmelegedésért: szén-dioxid (CO_2), metán (CH_4) és dinitrogén-oxid (N_2O). Az említett gázok összetételét a légkörben az 1. ábra szemlélteti. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a CO_2 a légkörben a legnagyobb mennyiségben van jelen, azonban az említett gázok mellett több olyan gáz is található, ami elhanyagolható mennyiségben van jelen ($< 1\%$), azonban kiemelkedő szerepet tölt be a globális felmelegedés folyamatában.

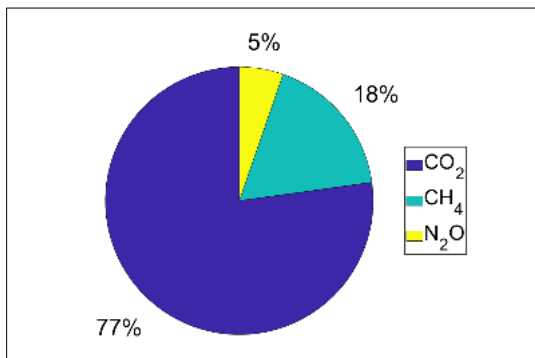
A légkörben található CO_2 -szint csökkentése érdekében megoldást jelenthet ezeknek a gázoknak a levegőből történő szelektív elválasztása ipari folyamatok segítségével, vagy a gyártási folyamatok során keletkező véggázak megfelelő tisztításával az ÜHG légkörbe való kibocsátásának a minimálisra csökkentése. Ezeket a módszereket szén-dioxid-leválasztásnak, -hasznosításnak és -tárolásnak, angolul „Carbon Capture, Utilization and Storage”-nek (CCUS) nevezik. A CO_2 más gázokkal ellentétben csak nagy mennyiségben tud kifejtetni kártékony hatást, kis globális felmele-

gedési potenciáljának köszönhetően. A CO_2 -hoz történő viszonyítás során a potenciál értéke a szén-tetrafluorid (CF₄) esetében 7380, míg a metán esetében 27,9. Ez a potenciál azt a számot fejezi ki, hogy az adott gáznak mennyivel nagyobb a globális felmelegedés elősegítésében betöltött szerepe a CO_2 -hoz képest [3, 4].

A CO_2 kártékony hatásai ellenére felhasználható fontos ipari folyamatokban, különösen a metanol, illetve a formaldehid gyártásában. A kémiai folyamatok során a CO_2 kémiai megkötésének legköltséghatékonyabb módja a kémiai körciklusok alkalmazása (CL), amely minimálisra csökkenti a szintézisfolyamatból származó szén-dioxid-kibocsátást. A CL egy gazdaságos ipari technológia, amely során fém-oxidok segítségével hajthatók végre olyan kémiai folyamatok, ahol a robbanásveszély miatt levegőt vagy O_2 -gázt nem lehet használni. A reaktorban oxigénhordozó anyagot (angolul „Oxygen Carrier”, OC) használnak, hogy oxigént kössenek meg vele a levegőből, majd a reaktortérben közvetlen módon történő oxidációs folyamatot lehessen elvégezni. Ilyen folyamatokat szokás alkalmazni a reformálási, illetve a nagy hőfokon és nyomáson történő égési reakciók esetében. Ezeknek a reaktorrendszereknek két ismert működéstípusa van: fluidágyas vagy rögzített ágyas csőreaktorok. A kalcium-körciklus egy módosított verziója az előbbi folyamatnak, ahol a csőreaktort Ca-alapú anyaggal töltik meg, amely kémiai kötésekkel tud kialakítani a CO_2 -vel, ezáltal megkötve azt. A legtöbb esetben erre a célra kalcium-oxidot (CaO) használnak, mivel olcsó, és a reakció hatásfoka is igen nagy [3, 4].

A kémiai ciklusos eljárásnak a következő szakaszokat kell tartalmaznia:

- **Karbonizációs lépés (A)**, amely során gőzzel történő reformálási folyamat játszódik le, melynek célja a tiszta H_2 előállítása, pontosabban a kék hidrogéné, amit nagy tisztaságának köszönhetően előszeretettel alkalmaznak precíz és fontos ipari folyamatokban. A folyamat során melléktermékként nagy mennyiségű CO_2 -gáz keletkezik, amit CaO segítségével kémiai módon megkötnek, ezzel elnyelve az in situ keletkező nem hasznos terméket;
- **Oxidációs lépés (B)**, ahol az oxigénhordozó (OH) anyag oxidációs folyamata zajlik;
- **Kalcinációs/redukciós folyamat** (C_1 , C_2 , C_3), ahol az aktivált/oxidált OH-anyag reagál a bevezetett reaktív gázokkal, ezzel nagy mennyiségű hő eredményezve, ami a kalcinálási folyamat során kerül felhasználásra. Ebben a lépésben kerül sor a kémiai módon megkötött CO_2



1. ábra. Az üvegházhatású gázok kibocsátásának összetétel szerinti lebontása [3]

felszabadítására is, amihez sok energiára van szükség.

A tanulmány célja egy komplex matematikai modell kidolgozása volt a kémiai körciklusos eljárás integrált égetéssel és szén-dioxid-elkülönítéssel (angolul „Chemical Looping with Integrated Combustion and CO₂ Capture”, CL-ICCC) történő szimulálására, valamint a modell természetének vizsgálata dinamikus körülmények között. Kutatásunk újdonsága a matematikai modell felépítésében mutatkozik meg. A modell kidolgozása mellett egy esettanulmányt is végeztünk a folyamat egy ciklusa gazdasági hatásainak vizsgálatára [6].

2. A kinetikai modell igazolása az irodalomban megtalálható adatok segítségével

A modellezési folyamat a kémiai reakciók kinetikájának meghatározásával és ellenőrzésével kezdődött el. A folyamatok elemzéséhez rengeteg szakirodalmi adat állt rendelkezésre. Számos szakirodalmi forrást áttekintettünk annak érdekében, hogy meghatározzuk a folyamatok reakciósebességét leíró legmegfelelőbb és legpontosabb kinetikai paramétereket, és az így kapott egyenletek felhasználásával pontos és megbízható matematikai modellt hozunk létre. A tanulmányban két fő folyamatnak a kinetikai vizsgálatát mutatjuk be, az oxidációs lépés esetében (a B folyamat) és a redukciós lépés három különböző tiszta gáz esetében (a C₁, C₂, és C₃ folyamatok). A karbonálási és a kalcinálási folyamatok esetében is hasonló ellenőrzési folyamatot hajtottunk végre.

2.1. Oxidációs lépés (B folyamat)

Az oxidációs szakasz esetében a rendszerben csupán egy kémiai reakció zajlik le. A szakirodalomban számos kinetikai egyenlet szerepel, amelyek jelentősen eltérnek egymástól. A legtöbb esetben a reakció sebességi egyenletét jelentősen

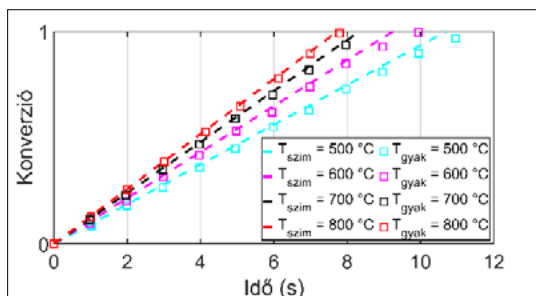
befolyásolja az O₂ egyensúlyi koncentrációja a gázfázisban vagy egyensúlyi parciális gőznyomása [7].

Ezzel szemben, ha a rendszerben szemcséket használnak, amelyeket vékony rétegben OH-anyaggal vonnak be, akkor a matematikai egyenlet jelentősen változik. Ebben az esetben a fizikai paraméterek és a sebességi állandó segítségével kell a reakcióidőt kiszámítani, és ebből meghatározni a folyamat sebességi együtthatóját vagy más néven a folyamat forrástagját. A kinetikai modell elkészítéséhez használt matematikai egyenleteket az (1)–(3) egyenletek mutatják. A tartózkodási idő meghatározásának legfontosabb tényezői közé tartozik az OH-anyag rétegvastagsága és moláris sűrűsége a szemcse felületén, ugyanakkor a gázfázisban lévő reagens koncentrációja is döntő jelentőségű. Számos forrás azonban arra utal, hogy ezen kémiai folyamat kinetikája nem lineáris, hanem inkább egy négyzetgyökfüggvényre hasonlító görbét követ [8]. Ennek tudatában mindkét típusú egyenlet esetében megvizsgáltuk a kinetikai paramétereket. A lineáris modell eredményei a várakozásoknak megfelelően jól illeszkednek a gyakorlati eredményekhez, de a négyzetgyökfüggvény esetében is kielégítően jó eredmények születtek, amint az a 2. és 3. ábrán látható. Ennek megfelelően a grafikonon emelkedő tendencia figyelhető meg, amelyből arra lehet következtetni, hogy a görbék meredekebben emelkednek majd, egyre jobban illeszkedve a megfelelő gyakorlati eredményekhez [8].

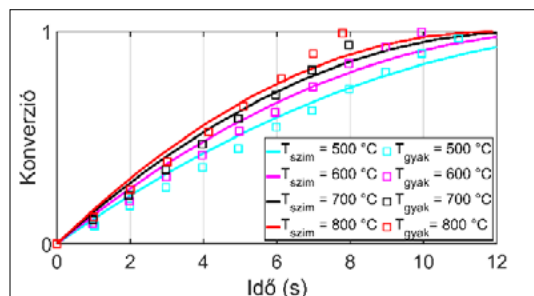
$$\tau_{ox} = \frac{I_{Cu} \rho_{m,Cu}}{b k_{ox} C_{O_2}^n} \quad (1)$$

$$\frac{dX_{ox}}{dt} = \frac{1}{\tau_{ox}} \quad (2)$$

$$\frac{dX_{ox}}{dt} = \frac{2}{\tau_{ox}} (1 - X_{ox})^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$



2. ábra. Az oxidációs folyamat ellenőrzési görbéje: Cu konverziója az idő szerint a (2) egyenlet alapján



3. ábra. Az oxidációs folyamat ellenőrzési görbéje: Cu konverziója az idő szerint a (3) egyenlet alapján

2.2. Kalcinálási lépés (C folyamatok)

A következő ipari szakasz a redukciós folyamat, amelynek során a megkötött CO_2 -gáz a keletkező nagy mennyiségű hőenergia segítségével felszabadul. Ezen folyamatok kinetikája szintén meg egyezik az oxidációs lépés kinetikájával. A szakirodalmi adatok segítségével összehasonlításra került több kinetikai egyenlet is, hasonlóan, mint az oxidációs lépésnél. Az ellenőrzési folyamat során három különböző redukciós gáz-komponenst vizsgáltunk: H_2 , CO és CH_4 . A matematikai modellek természetének a vizsgálatához a (4)–(6) egyenleteket használtuk fel [8].

$$\tau_{\text{red},i} = \frac{L_{\text{CuO}} \rho_{\text{m,CuO}}}{bk_{\text{red},i} C_i^n} \quad (4)$$

$$\frac{dX_{\text{red},i}}{dt} = \frac{1}{\tau_{\text{red},i}} \quad (5)$$

$$\frac{dX_{\text{red},i}}{dt} = \frac{2}{\tau_{\text{red},i}} (1 - X_{\text{red}})^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

2.2.1. Redukciós lépés H_2 -gázzal (C_1 lépés)

A redukciós folyamatok kinetikájának tekintetében az oxidációs folyamat során megfigyelt jelenség helytállónak bizonyult: a kinetikai paramétereket lineáris egyenlettel határozták meg, de azok csak egy bizonyos pontig egyeznek a kísérleti eredményekkel. A folyamat során a szilárd anyag konverziója növekszik, majd 6 másodperc elteltével ez az egyenes megtörik, és egy nagyon lassú növekedés következik, ahogyan azt a 4. ábra is jól illusztrálja a kísérleti eredmények segítségével. Ezek alapján kijelenthető, hogy a választott matematikai egyenlet típusa nem felel meg teljes mértékben a valóságnak; ezért a kísérleti adatokhoz egy négyzetgyökfüggvény illesztése pontosabb

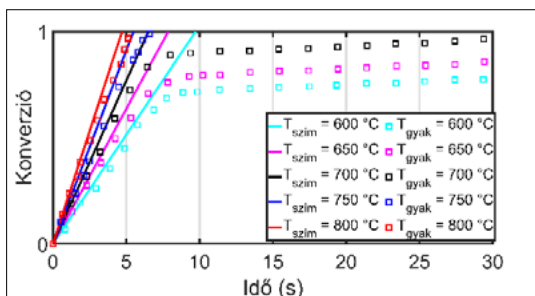
eredményt produkált.

Az 5. ábrán a (6)-os egyenlet használatával kapott szimulált eredmények és az irodalomból vett gyakorlati eredmények láthatóak. Ebben az esetben a szimulációs eredmények sokkal természetesebben illeszkednek a folyamathoz, azzal a jelentős különbséggel, hogy a matematikai modell egyes helyeken túllépi a felső határértéket a kísérleti eredményekhez képest. Ennek a jelenségnek a magyarázata az, hogy a kísérleti eredmények olyan hőmérséklet-változási tendenciát mutatnak, amelyből arra lehet következtetni, hogy nagyobb hőmérsékleteken a szilárd komponens maximális átalakulása megközelíti a 100%-ot, ahogyan azt az 5. ábra is mutatja. A folyamat során elengedhetetlen, hogy a reaktor elérje a szilárd fázis maximális átalakulását, mivel a fennmaradó át nem alakult szilárd komponensek negatív hatással lehetnek a későbbi folyamatokra, ezáltal olyan módon szennyezve a kapott termékeket, ami rendkívül költségessé tenné a tisztítási folyamatot.

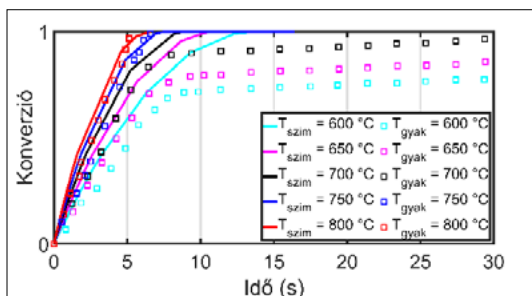
2.2.2. Redukciós lépés CO -gázzal (C_2 lépés)

A CO -gázzal végzett redukciós folyamat során egy egyszerű kémiai reakció játszódik le, amelynek során az üzemanyag CO_2 -dá alakul át, így az elválasztás sokkal egyszerűbben végezhető el. Összességében nézve a folyamatot, nagy mennyiségű termék keletkezik, ami megkönnyíti az elválasztási lépéseket és előirányozza a tárolás előkészítését, ami nagy nyomáson történő sűrítést jelent.

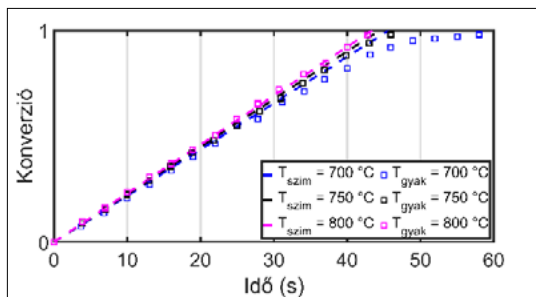
A lineáris egyenlet csak a töréspontig képes megfelelően lekövetni a kísérleti adatokból rajzolt grafikont (6. ábra). A kísérleti adatok sokkal természetesebben illeszkednek a (6) egyenlethez, amint azt a 7. ábra is mutatja. Ha a redukciós lépést CO -gázzal hajtják végre, akkor figyelembe kell venni, hogy a folyamat a H_2 -gázhoz képest



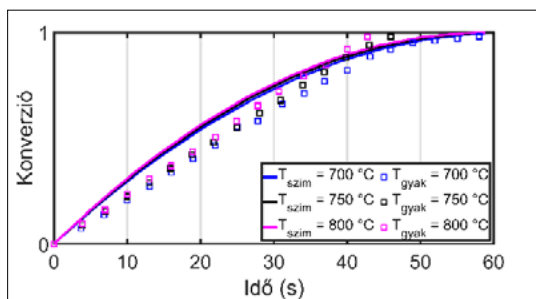
4. ábra. A redukciós folyamat ellenőrzési görbéje: CuO konverziója az idő szerint az (5) egyenlet szerint, H_2 gáz esetén



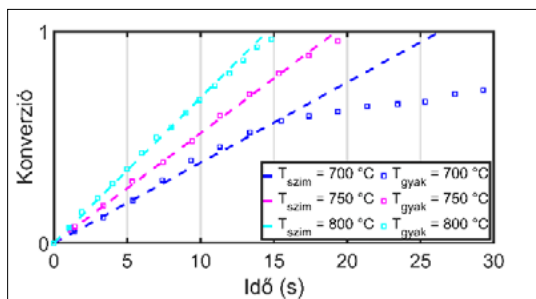
5. ábra. A redukciós folyamat ellenőrzési görbéje: CuO konverziója az idő szerint a (6) egyenlet alapján, H_2 gáz esetén



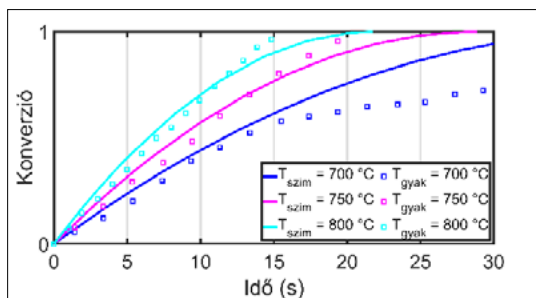
6. ábra. A redukciós folyamat ellenőrzési görbéje: CuO konverziója az idő szerint az (5) egyenlet alapján, CO-gáz esetén



7. ábra. A redukciós folyamat ellenőrzési görbéje: CuO konverziója az idő szerint a (6) egyenlet alapján, CO-gáz esetén



8. ábra. A redukciós folyamat ellenőrzési görbéje: CuO konverziója az idő szerint az (5) egyenlet alapján, CH₄-gáz esetén



9. ábra. A redukciós folyamat ellenőrzési görbéje: CuO konverziója az idő szerint a (6) egyenlet alapján, CH₄-gáz esetén

sokkal lassabb lesz. A gyakorlatban ez a jelenség a diffúziós hatásoknak és a gázmolekulák méretének tulajdonítható. CO-gáz esetében a csúcs körülbelül 45 másodperc után jelentkezik, és pontosan 7,5-szer lassabb, mint H₂ esetében.

2.2.3. Redukciós lépés CH₄-gázzal (C₃ lépés)

A CH₄-gáz esetében az elemzés hasonló módon zajlott le; mindkét egyenlet típusnál az (5) és (6) egyenletek szimulált eredményeit illesztettük a kísérleti adatokhoz. Az előző esetekhez hasonlóan a lineáris egyenlet (5. egyenlet) nagy pontossággal illeszkedik a kísérleti adatokhoz; azonban itt is megjelenik egy csúcspont, ahol a görbék megtörnek, és ezt követően egy sokkal lassabb növekedés figyelhető meg (8. ábra). Ebben az esetben is a négyzetgyökfüggvény biztosít megbízhatóbb eredményeket, mivel a matematikai modell grafikus ábrázolásán a törésponttal összhangban változik a grafikus kép görbülete (9. ábra). Kinetikája alapján ez a fajta redukció a másik két üzemanyag közé sorolható: a kimutatható töréspont körülbelül 15 másodpercnél jelentkezik, ami pontosan 2,5-szer lassabb, mint a H₂-gáz esetében.

3. Esettanulmány gazdasági tanulmányozása a bemutatott folyamat egy teljes ciklusa alatt

A matematikai modellek validálását követően egy egyszerű esettanulmányt végeztünk el annak megállapítására, hogy egy teljes ciklus során mennyi hasznos gáz és mennyi villamos energia nyerhető vissza a folyamatból. A szimulációkat MATLAB/Simulink szoftverrel, „ode15s” megoldó algoritmussal és az irodalomban fellelhető adatok segítségével hajtottuk végre [6, 7, 8]. Az 1. táblázat a különböző folyamatok során nyert hasznos termékek mennyiségét mutatja be.

Az 1. táblázatban szereplő ipari lépések rövidítéseit a bevezetőben határoztuk meg, illetve az alfejezetek címeiben is láthatóak. A folyamat során számos olyan tényező léphet fel, amely csökkentheti a hatékonyságot. Ilyen eset például a kalcinációs folyamat megkezdődése az oxidációs lépés során, ami a CaCO₃ mennyiségének csökkenését okozza; pontosabban a teljes mennyiség 7%-a vész el a folyamat során. Ugyanakkor a redukciós lépés végrehajtásához a folyamat során H₂ fogyasztásra kerül sor, így gazdaságosabb lépés a belső forrásokra támaszkodni; más szavakkal, a gyártósor a szükséges nyersanyagokat is előállítja.

A 2. táblázat tartalmazza a folyamatok energiaigényét, valamint a folyamatok előtti sűrítési

1. táblázat. Az ipari folyamat egy teljes ciklusa során felhasznált és termelt gázok mennyisége folyamatonként

Gázmennyiség folyamatonként (kmol/ciklus)						
	H ₂	CO	CH ₄	H ₂ O	CO ₂	O ₂
A	6654	0	-1700	-3256	1557	0
B	0	0	0	0	0	-982
C1	-1963	0	0	1963	0	0
C2	0	-1963	0	0	1963	0
C3	0	0	-491	982	491	0
Teljes mennyiség redukciós folyamat szerint (kmol/ciklus)						
C1	4691	0	-1700	-1293	1557	-982
C2	6654	-1963	-1700	-3256	3520	-982
C3	6654	0	-2191	-2274	2048	-982

2. táblázat. Az ipari folyamat során befektetett és visszanyert energia mennyisége (a kompressziós és előmelegítési lépést figyelembe véve)

	Bemeneti energia mennyisége	Kimeneti energia mennyisége
Karbonálási lépés	64,5 MW	53,2 MW
Oxidációs lépés	145 MW	62 MW
Redukciós lépés	0	0
Teljes mennyiség	209 MW	115 MW

műveletben és a kezdeti hőmérséklet-szabályozási műveletben visszanyerhető maximális energiamentiségeket. Az energiamentiség nem tartalmazza a reaktor előmelegítéséhez szükséges energiát, a kémiai folyamat során felhasznált energiát, és nem veszi figyelembe a hőcserélők segítségével visszanyerhető energiamentiséget sem. A legtöbb esetben a termék nagy hőmérsékleten hagyja el a reaktort, és kondenzátorokon halad át a keletkező vízgőz elválasztása és kinyerése érdekében. Az így visszanyert energia fedezheti a befektetett energia nagy részét. A 2. táblázatban szereplő mennyiségek esetében a karbonizációs folyamatba befektetett energia 82,6%-a, az oxidációs folyamatba befektetett energia 42,9%-a nyerhető vissza. A kémiai reaktorból származó energiavesztés nem vettük figyelembe, az üzemi paramétereket pedig szakirodalmi források segítségével állapítottuk meg [9, 10]. Ennek alapján a kompresszor hatékonyságát 90%-ra, a gázturbinát pedig 40%-ra állítottuk be. A leírt módon a redukciós folyamat során nem nyerhető

vissza energia, mivel a folyamat légköri nyomáson zajlik; a befektetett energia csak hőcserélők segítségével nyerhető vissza.

4. Következtetések

Tanulmányunkban a kinetikai paraméterek vizsgálatát és igazolását a szakirodalomban szereplő eredmények megbízhatóságának igazolása céljából végeztük el. Az elemzést a rendszerben lejátszódó összes kémiai reakcióra kiterjesztettük. A szimulációs eredményeket összehasonlítottuk a szakirodalomban szereplő kísérleti adatokkal, ezzel igazolva, hogy modelljeink pontosan tükrözik a folyamat természetes viselkedését. A szimulációt követően meghatározható volt a termelhető H₂ mennyisége és a keletkező CO₂ mennyisége.

A komponensek monitorozásával párhuzamosan meghatároztuk a visszanyert energia mennyiségét is, ezzel bizonyítva a folyamatok gazdasági önfenntarthatóságát. A legjobb esetben 13,31 tonna H₂-gáz állítható elő 84,79 tonna CO₂-gáz mellett egy ciklus alatt. A jelenlegi piaci árakat figyelembe véve a folyamat a legjobb esetben ciklusonként 54033,38 dollár nyereséget eredményezhet, feltéve, hogy az összes keletkező termék sikeresen eladható [11]. Az ipari folyamat teljes ciklusa körülbelül 1 órát vesz igénybe, attól függően, hogy további folyamatokat is becsatlakoztatnak a folyamatba. A kapott eredmények biztatóak, lehetőséget nyitva arra, hogy a bemutatott folyamatot sokkal környezetbaráttá és gazdaságosabbá lehessen tenni. A további kutatási célok között szerepel a folyamat átfogó és részletes energetikai és pénzügyi tanulmányának elkészítése mind szakaszos, mind folyamatos üzemmódban.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Sapientia Hungariae Alapítvány támogatásával, a Collegium Talentum ösztöndíjprogram keretein belül valósult meg.

Jelmagyarázat

X_y	y folyamat konverziója, y = oxidáció, redukció, dimenzió nélküli
k_y	y reakció sebességi állandója, y = oxidáció, redukció, m/s
C_i	az i komponens koncentrációja, kmol/m ³
P	teljes nyomás, Pa
P_0	teljes nyomás kezdeti értéke, Pa
L_{Cu}	Cu rétegvastagsága, m
$\rho_{m,Cu}$	a Cu-réteg moláris sűrűsége, kmol/m ³
b	a szilárdfázisban található kiindulási anyag sztöchiometriai együtthatója, dimenzió nélküli

n reakciórendűség, dimenzió nélküli
 τ_j a j folyamat működési ideje, s

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Yan Y., Pang Y. X., Luo X., Lin Q., Pang C. H., Zhang H., Gao X., Wu T.: *Carbon Dioxide-Focused Greenhouse Gas Emissions from Petrochemical Plants and Associated Industries: Critical Overview, Recent Advances and Future Prospects of Mitigation Strategies*. Process Safety and Environmental Protection, 188. (2024) 406–421.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.136>
- [2] Alves M. O., Nelson De Goes L. M., Simonelli G.: *Impact on Greenhouse Gas Emissions in the Ammonia Production Process by Reusing Heat in the CO₂ Absorption Stage*. Energy Conversion and Management, 347. (2026) 120534–120548.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120534>
- [3] Greenhouse gas emissions, Our World in Data. 2025. <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions> (letöltve: 2026. március 25.)
- [4] Mazhar S., Mumtaz M. W., El Oirdi M., Mukhtar H., Raza M. A., Fahren M., Aatif M., Muteeb G.: *Synergizing advanced materials and artificial intelligence for next-generation carbon capture, utilization, and storage (CCUS): a review*. RSC Advances, 16/3. (2026) 2621–2651.
<https://doi.org/10.1039/D5RA07338C>
- [5] Zhao Y., Liu D., Feng Y., Zhou S., Ma J., Ma J.: *Behavior and Design of Fe-Based Oxygen Carriers in Chemical Looping Combustion: A Review*. Chemical Engineering Journal, 499. (2024) 156582–156612.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156582>
- [6] Fernandez J. R., Abanades J. C., Murillo R.: *Modeling of sorption enhanced steam methane reforming in an adiabatic fixed bed reactor*. Chemical Engineering Science, 84. (2012) 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.07.039>
- [7] San Pio M. A., Martini M., Gallucci F., Roghair I., van Sint Annaland M.: *Kinetics of CuO/SiO₂ and CuO/Al₂O₃ Oxygen Carriers for Chemical Looping Combustion*. Chemical Engineering Science, 175. (2018) 56–71.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.09.044>
- [8] García-Labiano F., De Diego L. F., Adánez J., Abad A., Gayán P.: *Reduction and Oxidation Kinetics of a Copper-Based Oxygen Carrier Prepared by Impregnation for Chemical-Looping Combustion*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 43/26. (2004) 8168–8177.
<https://doi.org/10.1021/ie0493311>
- [9] Astolfi M., Diego M. E., Romano M., Abanades J. C.: *Integration of a novel Chemical Looping Combustion reactor into a thermochemical energy storage system*. Energy Conversion and Management, 291. (2023) 116985–117008.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116985>
- [10] Cormoš C.-C.: *Integrated assessment of IGCC power generation technology with carbon capture and storage (CCS)*. Energy, 42. (2012) 434–445.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.025>
- [11] Curcio E.: *Techno-economic analysis of hydrogen production: Costs, policies, and scalability in the transition to net-zero*. International Journal of Hydrogen Energy, 128. (2025) 473–487.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.013>



Kompozit szendvicspanelek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata

Examination of the Mechanical Properties of Composite Sandwich Panels

Bodrogai László Anzelm,¹ Schramkó Márton,² Varga Bálint³

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

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar/ Anyagok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest, Magyarország, schramko.marton@bgk.uni-obuda.hu

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

Abstract

The present study examines the effect of layer composition on the mechanical properties of lightweight composite sandwich panels by evaluating six distinct configurations. The cores of the test specimens measured 600×100×50 mm, with reinforcement layer thicknesses ranging from ~ 0.5–1 mm on the side surfaces and ~ 3.3–5.5 mm on the top and bottom surfaces, depending on the specific layering. All specimens were fabricated using the hand lay-up method for matrix application and vacuum bagging for lamination. Mechanical performance was evaluated through three-point bending tests conducted at a constant speed of 10 mm/min. The results indicate that the specimens with an additional carbon fiber reinforcement layer (C200T) exhibited a 69.57% higher load-bearing capacity than the base specimen (U165P), with only a 23.83% increase in weight. Variations in the areal weight of glass fabric did not result in significant differences. Specimens with 5 mm-thick PVC foam (PVC5) also outperformed the base specimens (U165P) considerably, achieving a 27.17% higher load-bearing capacity with only a 13.90% increase in weight.

Keywords: sandwich panel, composite, three-point bending, foam core, fiber reinforced composite.

Összefoglalás

Jelen tanulmány hat különböző konfiguráció kiértékelésével vizsgálja a rétegrend hatását a könnyűszerkezetes kompozit szendvicspanelek mechanikai tulajdonságaira. A próbatestek magmérete 600×100×50 mm, az erősítőrétegek vastagsága pedig az adott rétegrend függvényében az oldalsó felületeken ~ 0,5–1 mm, míg az alsó és felső felületeken ~ 3,3–5,5 mm között változott. A próbatestek gyártása során a mátrixanyag felhordása kézi eljárással történt, amelyet vákuumszásos laminálás követett. A mechanikai tulajdonságok elemzése 10 mm/min állandó sebességű hárompontos hajlítóvizsgálattal történt. Az eredmények alapján megállapítható, hogy az extra szénszálréteget tartalmazó (C200T) próbatestek teherbíró képessége 69,57%-kal haladta meg az alap próbatestét (U165P), miközben tömegük mindössze 23,83%-kal növekedett. Az üvegszövet felületi tömegének változtatása nem eredményezett szignifikáns eltérést. Az 5 mm vastagságú PVC habbal (PVC5) készült próbatestek eredményei szintén jelentősen felülmúlták az alapkonfigurációt (U165P): 13,90%-os tömegnövekedés mellett 21,17%-kal nagyobb lett a teherbíró képesség.

Kulcsszavak: szendvicspanel, kompozit, hárompontos hajlítás, habmag, szálerősítésű kompozit.

1. Bevezetés

A kompozit anyagok a 21. század technológiájának és iparának meghatározó alapkövei. A kompozit olyan, legalább két eltérő fizikai tulajdonságú anyagból álló szerkezet, amelynek egyesített jellemzői felülmúlják az alkotóelemek eredeti tulajdonságait.

A kompozitok általában két fő komponensből épülnek fel:

A mátrixanyag (vagy kötőanyag), amely lehet többek között polimer, fém vagy kerámia. A mátrix felelős az anyag alakjának megtartásáért, valamint az alkotóelemek egységbe fogásáért.

Az erősítőanyag biztosítja az anyag nagy szilárdságát és merevségét. Ez leggyakrabban szálakból vagy szemcsékből áll, amelyek anyaga lehet például üveg, szén vagy aramid.

Fontos megjegyezni, hogy az erősítőszálak orientációja és elrendezése döntő hatással van az anyag végső tulajdonságaira. A megfelelő adhézió elérése érdekében az anyagokat elő kell készíteni, ami különböző módszerekkel, például mechanikai érdesítéssel vagy kémiai kezeléssel történhet. Szálerősítésű epoxigyanta rendszerek esetében általában kémiai kezelést alkalmaznak. Ez biztosítja a kompozit anyag összetevői közötti határfelületi zóna megfelelő kialakulását. Ez a mátrixanyag és az erősítőszál között elhelyezkedő átmeneti réteg, mely mindkét anyag fizikai tulajdonságait ötvözi. Továbbá a szálak kémiai előkezelése elősegíti a mátrixanyag jobb behatolását az erősítőszálak közé.

A szendvicspanelek olyan kompozit szerkezetek, amelyek egy kis sűrűségű maganyagból és az azt közrefogó, kétoldali vékony rétegből állnak.

Az alsó és felső réteget jellemzően üveg- vagy szénszállal erősített polimer kompozit alkotja, amely nagy szilárdságot és merevséget biztosít a panelnek.

A maganyag általában kis sűrűségű anyagból, leggyakrabban poliuretánból vagy egyéb polimer habból készül.

2. Anyagválasztás

A végső szerkezet a következő rétegekből épül fel: expandált polisztirol (EPS) maganyag, üvegszálas kompozit réteg, merev PVC habréteg, valamint a felső teherhordó réteg, amely különböző szövésű, szálirányú és szálszámú szénszövetből áll.

2.1. A szénszál és az üvegszál összehasonlítása

A szálerősítésű polimerekben az üvegszál és a szénszál a két elsődlegesen használt erősítőanyag. Az üvegszál költséghatékonyabb, és nagyobb rugalmasságot tesz lehetővé a kompozit rendszerekben; ugyanakkor a szénszállhoz viszonyítva sűrűsége nagyobb, mechanikai tulajdonságai pedig gyengébbek. Továbbá az üvegszál erősítés jellemzően gyengébb határfelületi zónát eredményez a mátrixanyag és az erősítőszálak között, mint a szénszál. A költséghatékonyág mellett az üvegszál nagyobb keménysége alkalmasabbá teszi az alatta lévő rétegek védelmére, ezáltal csökkentve a delamináció kockázatát. Ezzel szemben a szénszál kiváló mechanikai tulajdonságú, ezért elsősorban teherhordó réteggént alkalmazzák [1, 2, 3].

2.2. Szövés módok

A vizsgálatok sávoly- és zsákszövésű szövetek, valamint biaxiális és egyirányú szálerősítések alkalmazásával történtek.

A sávoly- és zsákszövésű kelméknek kisebb a teherbíró képességük, mint az egyirányú vagy biaxiális erősítéseknek, mivel a szálak jelentős része nem párhuzamos a ráható erővel. Ez a gyengülés azonban kevésbé hátrányos, mint ha a terhelés a szálirányra merőlegesen történne [4, 5].

Az anyagválasztás során meghatározó szempont volt az is, hogy a sávolszövésű anyagból készült kompozitok hajlítoszilárdsága nagyobb, mint a zsákszövésűeké, szakítoszilárdságuk azonban kisebb [6].

2.3. Maganyag

A vizsgálatokhoz maganyagként közepes sűrűségű expandált polisztirol (EPS 100) habot alkalmaztunk. Az EPS 100 sűrűsége 20 kg/m^3 , a 2%-os összenyomódáshoz tartozó nyomószilárdsága pedig 30 kPa . Ezzel a habanyaggal biztosítható volt a próbatestek kis tömege, valamint lehetővé vált a különböző konfigurációk összehasonlítása.

2.4. Keményhab anyag (PVC)

A keményhab kiválasztása során három anyag: az XPS, a PVC és a Corecell fizikai tulajdonságait hasonlítottuk össze. Ezek közül a PVC-habnak voltak a legkedvezőbb tulajdonságai. A különböző sűrűségű PVC-habok közül a 80 kg/m^3 -es változatra esett a választás. Bár a nagyobb sűrűségű PVC-habok általában kedvezőbb fizikai tulajdonságokkal bírnak, a 80 kg/m^3 -es hab biztosítja az optimális egyensúlyt a tömeg és a mechanikai

jellemzők között [7, 8]. A PVC-hab fajlagos fizikai tulajdonságainak növekedése 80 kg/m^3 sűrűségig intenzívebb, mint a sűrűség növekedése, azonban nagyobb sűrűségek esetén ez a tendencia megfordul. Továbbá a kisebb sűrűségű PVC-habok, a statikus szilárdságra vonatkoztatva, jellemzően nagyobb relatív kifáradási szilárdságot mutatnak [9].

2.5. Kiválasztott anyagok

- X-C-305 g/m^2 -1270 mm (C305B)
- 200 GSM T CARBON FABRIC (C200T)
- SIGRATX® C U290-PL1/1 (C290UD)
- E-glass fabric UNIGLASS 80P (U80P)
- E-glass fabric UNIGLASS 163P (U163P)
- E-glass fabric UNIGLASS 165T (U165P)
- E-glass fabric UNIGLASS 220P (U220P)
- EPS 100
- PVC Foam 80k g/m^3 (PVC3/PVC5)
- SR 1280 SD/ SD 4773 Epoxy Resin

3. Gyártási folyamat

A gyártási folyamat az EPS 100 maganyag méretre vágásával kezdődött, hődrótos vágóberendezéssel. A maganyag méretei $600 \times 100 \times 50 \text{ mm}$, a hosszúság és a szélesség tekintetében a tűrés $\pm 1\text{--}5 \text{ mm}$ volt, míg a vastagságbeli kezdeti eltérés elhanyagolhatónak bizonyult.

Ezt követően történt a PVC-hab pontos méretre vágása, igazodva az egyes próbatetek EPS-magjának méreteihez. A következő lépésben a szövet-anyagok méretre szabása történt meg.

3.1. Rétegzési rend és meghatározása

Az alsó réteget üvegszál alkotja, amely maximális védelmet biztosít a mag számára. A PVC-hab közvetlenül e felett helyezkedik el. A keményhab réteg tetejére különböző típusú szénszövetek kerültek, amelyek erősítő és teherviselő réteggé funkcionálnak.

A vizsgálathoz hat, eltérő rétegrenddel jellemezhető próbatet-variáció előkészítése történt meg. Minden variációból két próbadarab készült.

Minden próbatet esetében azonosak voltak a külső rétegek és a mátrixanyag. Az egyik oldalon a külső réteget a 305 g/m^2 -es biaxiális szénszövet (C305B) alkotja, míg a szemközti oldalon a 290 g/m^2 -es egyirányú szövet (C290UD) található.

A folytonosság biztosítása érdekében a próbatetek oldalán a szövetek átlapolással illeszkedtek. A minták mindegyike azonos, 3 mm vastag PVC keményhabbal készült, kivéve egyet, amelyen 5 mm vastag volt a habréteg. Az eltérő összetétel megkülönböztetésére külön jelölés (PVC5) szol-

gált. Azokban az esetekben, ahol a próbatetek elnevezése nem tartalmazza az üvegszövet besorolását (pl. U80P, U220P), 165 g/m^2 -es zsákszövetű üvegszövet (U165P) szolgált.

1. táblázat. Különböző variációk rétegzése

	Variációk					
	C200T	U80P	U220P	U165P	U163T	PVC5
1	C305B	C305B	C305B	C305B	C305B	C305B
2	C200T	PVC3	PVC3	PVC3	PVC3	PVC5
3	PVC3	U80P	U220P	U165P	U163T	U165P
4	U165P	EPS	EPS	EPS	EPS	EPS
5	EPS	U80P	U220P	U165P	U163T	U165P
6	U165P	PVC3	PVC3	PVC3	PVC3	PVC5
7	PVC3	C290U	C290U	C290U	C290U	C290U
8	C200T					
9	C290U					



1. ábra. Ép keresztmetszet

3.2. Laminálási folyamat és módszertan

A mátrixanyag felhordása kézi laminálással történt, az erősítőrétegek egyidejű elhelyezésével. Ezt a folyamatot a vákuumzsákos laminálás követte. Az eljárás limitációi: egyenetlen gyantaeloszlás és inkonzisztens reprodukálhatóság.

A vákuum mértéke $20\text{--}25 \text{ kPa}$ volt, amely az EPS 100 habokban körülbelül $1\text{--}2\%$ -os összenyomódást eredményez. Ez az érték az ilyen sűrűségű EPS-anyagok képlékeny alakváltozásának alsó határa, $\sim 4\%$ alatt marad [10, 11].

4. Vizsgálati módszertan

A mechanikai vizsgálat elvégzésére egy Hegewald & Peschke – EU-40 Inspekt Retrofit – 400 kN típusú géppel került sor.

A mechanikai jellemzés hárompontos hajlítóvizsgálattal valósult meg. A támaszok elhelyezése szimmetrikusan, a középponttól oldalanként

250 mm távolságra történt. A támasztőhengerek átmérője 50 mm, míg a nyomóhengeré 30 mm volt. A vizsgálat végrehajtása 10 mm/min állandó elmozdulási sebességgel történt.

4.1. Vizsgálati adatok és eredmények

A próbatetek vizsgálati adatai a **2. táblázat**ban láthatóak.

2. táblázat. Típusulajdonságok

Típus	Tömeg (g)	Max. erő (N)	Tömeg- eltérés (%)	Erő- eltérés (%)
C200T	446	3229,6	4,35	17,92
C200T	427	2698,4		
U80P	303	1505	3,25	7,97
U80P	313	1389,6		
U165P	344	1667,2	4,82	9,24
U165P	361	1828,8		
U160T	342	1456,8	na	na
U220P	344	1352	5,37	3,84
U220P	363	1301		
PVC5	384	2054	8,72	15,12
PVC5	419	2390		

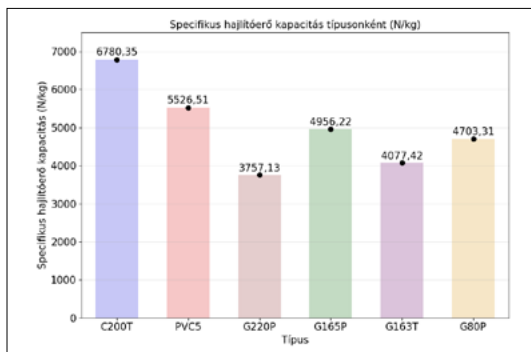
Az eredmények alapján megerősítést nyert az a kezdeti feltételezés, miszerint az extra szénszövet-réteg alkalmazása jelentős növekedést eredményez a teherbíró képességben az alap próbatest-hez (U165P) képest, mind a relatív, mind a fajlagos szilárdság tekintetében.

Összességében a mért értékek egyezést mutatnak az előzetes várakozásokkal. A minták terhelési értékei megfeleltek a feltételezett mechanikai jellemzőknek és anyagtulajdonságoknak. Egy kivétel adódott: az U220 jelű minta eredményei jelentősen eltértek a várt értékektől. Ez az eltérés valószínűsíthetően a mátrixanyag kézi felhordására vezethető vissza.

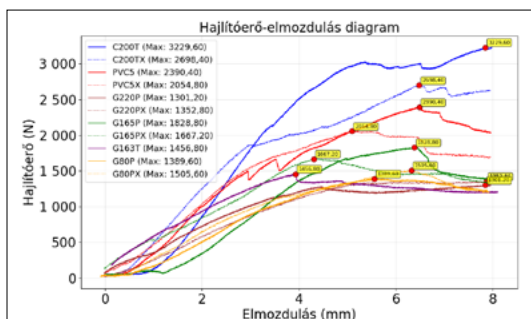
Az erő–elmozdulás diagram az előzetes várakozásoktól eltérő eredményeket mutatott. A próbatetek meghibásodása 4 mm-es elmozdulás után következett be, ami a vártnál kisebb merevségre utal. A megfigyelt tönkremenetel módja valószínűsíthetően a hajlító- és nyírófeszültségek együttes hatásából adódott.

5. Konklúzió

A hipotézissel összhangban megállapítható, hogy az extra szénszövet erősítést tartalmazó (C200T) próbateteké a legnagyobb relatív és fajlagos szilárdság.



2. ábra. Specifikus hajlítórő alakulásának diagramja



3. ábra. Hajlítórő–elmozdulás diagram



4. ábra. A darab felületén látható hibák



5. ábra. A tönkremenetel utáni keresztmetszet képe

A C200T változat az U165P alapkonfigurációhoz viszonyítva 23,83%-os tömegnövekedés mellett 69,57%-kal nagyobb maximális hajlító teherbíró képességet eredményezett.

A PVC5 változat esetében az U165P alapkonfigurációhoz képest 13,9%-os tömegnövekedés és 27,17%-kal nagyobb maximális hajlító teherbíró képesség volt megfigyelhető.

A kapott eredmények alapján a PVC5 anyagösszetétel bizonyos feltételek mellett, potenciális költségelőnyökkel alkalmas lehet a C200T kompozíció kiváltására. A két próbatípus közvetlen összehasonlítása rámutat, hogy a C200T a PVC5 változathoz képest 8,72%-kal nagyobb tömeg és 33,39%-kal nagyobb maximális hajlító teherbíró képességgel rendelkezik.

Az üvegszálak változatok között nem mutatkozó szignifikáns különbség. A szendvicsszerkezetre gyakorolt hatásuk további elemzése ütvehajlító vizsgálatok segítségével fog megvalósulni.

Az U220P változatnál tapasztalt váratlanul kis értékek igazolása nagyobb mintaszámon végzett, ismételt vizsgálatokat tesz szükségessé.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Cai Y. et al.: *Study on the mechanical properties of a carbon-fiber/glass-fiber hybrid foam sandwich structure*. Materials, 17/9. (2024) 2023. <https://doi.org/10.3390/ma17092023>
- [2] Suresh G., Jayakumari L. S.: *Evaluating the mechanical properties of E-Glass fiber/carbon fiber reinforced interpenetrating polymer networks*. Polímeros, 25/1. (2015) 49–57. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1650>
- [3] Zhang C., Rao Y., Li Z., Li W.: *Low-velocity impact behavior of interlayer/intralayer hybrid composites based on carbon and glass non-crimp fabric*. Materials, 11/12. (2018) 2472. <https://doi.org/10.3390/ma11122472>
- [4] Subhedar K. M., Chauhan G. S., Singh B. P., Dhakate S. R.: *Effect of fibre orientation on mechanical properties of carbon fibre composites*. Indian J. Eng. Mater. Sci. IJEMS, 27/6. (2021) 1100–1103. <https://doi.org/10.56042/ijems.v27i6.47552>
- [5] Mohamed Y. S., Abdelbary A.: *Theoretical and experimental study on the influence of fiber orientation on the tensile properties of unidirectional carbon fiber/epoxy composite*. Alexandria Engineering Journal, 67. (2023) 693–705. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.12.058>
- [6] Campos, Soufen C., Bueno M., Imaizumi M.: *Comparative study of mechanical properties of woven of carbon fiber twill and plain weave in laminates with epoxy matrix*. Brazilian Conference on Composite Materials, 2. (2014). https://www.researchgate.net/publication/275023325_COMPARATIVE_STUDY_OF_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_WOVEN_OF_CARBON_FIBER_TWILL_AND_PLAIN_WEAVE_IN_LAMINATES_WITH_EPOXY_MATRIX (letöltve: 2025. szeptember 3.)
- [7] Gimenez I., Farooq M.-K., El Mahi A., Kondratas A., Assarar M.: *Experimental analysis of mechanical behaviour and damage development mechanisms of PVC foams in static tests*. Materials Science, 10/1. (2004) 34–39. <https://doi.org/10.5755/j02.ms.26596>
- [8] Luong D. D., Pinisetty D., Gupta N.: *Compressive properties of closed-cell polyvinyl chloride foams at low and high strain rates: Experimental investigation and critical review of state of the art*. Composites Part B: Engineering, 44/1. (2013) 403–416. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.060>
- [9] Kanny K., Mahfuz H., Carlsson L. A., Thomas T., Jeelani S.: *Dynamic mechanical analyses and flexural fatigue of PVC foams*. Composite Structures, 58/2. (2002) 175–183. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00160-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00160-5)
- [10] Vilau C., Dulescu M. C.: *Investigation of mechanical behaviour of expanded polystyrene under compressive and bending loadings*. Mater. Plast., 57/2. (2019) 199–207. <https://doi.org/10.37358/MP.20.2.5366>
- [11] Chen W., Hao H., Hughes D., Shi Y., Cui J., Li Z.-X.: *Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene*. Materials & Design, 69. (2015) 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.12.024>



Tengerjáró hajókon alkalmazható, a termikus szárítás elvén működő berendezés keverőtartályának anyagvizsgálata

Material Testing of the Mixing Tank of Equipment Operating on the Principle of Thermal Drying for Use on Sea-Ship

Kári-Horváth Attila,¹ Lantos Zsolt,² Bara Adrián³

¹ Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Műszaki Intézet, Anyagtudományi és Gépipari Folyamatok Tanszék. Gödöllő, Magyarország, kari-horvath.attila@uni-mate.hu

² Gyémánt-Pirazol Kft. Debrecen, Magyarország, zsolt.lantos@gyemantpirazol.hu

³ Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Műszaki Intézet. Gödöllő, Magyarország, baraadrian01@gmail.com

Abstract

This article describes waste treatment options and the operating principle of thermal drying, a process in which moisture is removed using thermal energy. The equipment has a modular design and utilizes a pressure-retaining steel tank, whose welded joints are critical to safety. The authors examined various welding processes (submerged arc and TIG) and verified the quality of the welds using mechanical and non-destructive tests. The results showed that all tested joints met, and in many cases exceeded, the specified strength and quality requirements. Radiographic testing confirmed defect-free welds, so the chosen technology can be considered reliable and safe.

Keywords: welded structure; pressure vessel; welding technology; safety, reliability; quality control, material testing.

Összefoglalás

A cikk a hulladékkezelési lehetőségeket és a termikus szárítás működési elvét ismerteti, amely során a nedvességet hőenergia segítségével távolítják el. A berendezés moduláris felépítésű, és nyomástartó acéltartályt alkalmaz, amelynek hegesztett kötése kulcsfontosságúak a biztonság szempontjából. A szerzők különböző hegesztési eljárásokat (fedett ívű és TIG) vizsgáltak, valamint mechanikai és roncsolásmentes tesztekkel ellenőrizték a varratok minőségét. Az eredmények szerint minden vizsgált kötés megfelelt, sőt több esetben meghaladta az előírt szilárdsági és minőségi követelményeket. A radiográfiai vizsgálatok hibamentes varratokat igazoltak, így a választott technológia megbízhatónak és biztonságosnak tekinthető.

Kulcsszavak: hegesztett szerkezet; nyomástartó edény; hegesztési technológia; biztonság, megbízhatóság; minőség-ellenőrzés, anyagvizsgálat.

1. Hulladékkezelési lehetőségek

A hulladékhierarchia rendszere segít felállítani a hulladékgazdálkodás-tevékenységek közötti fontossági sorrendet, ami alapján – bizonyos kivételektől eltekintve – a legjobb megoldás a megelőzés. Azonban ha ez bizonyos körülmények között nem lehetséges, akkor a lehető legtöbb hulladék

esetében kell alkalmazni az újrafeldolgozást, és csak legvégső esetben lehet a hulladékot elégetni vagy lerakni [1].

A környezet és az egészségünk számára is legkárosabb megoldás a hulladéklerakás, ugyanakkor ez a legolcsóbb [2]. A hasznosítás tehát a hulladék olyan módon történő felhasználását jelenti, amely a nyersanyagok és erőforrások cseréjét eredmé-

nyezi. A hasznosításnak két fő típusa ismert, az anyagviasszanyerés és az energia-visszanyerés. Az alkotóelemek hasznosítását, újrafeldolgozását és regenerálását többek között az anyagában való hasznosításnak kell tekinteni. Az adott berendezés egy nedves hulladékszáritó berendezés.

Jelen cikk egy ilyen hulladékkezelésre szolgáló berendezés egyik elemének (keverőtartályának) az anyagvizsgálatát mutatja be.

2. A termikus szárítás elve

A szárítás alapvetően a folyadék szilárd anyagból történő bepárlásával történő eltávolításának jelensége. A folyadék és a szilárd anyag elválasztásának mechanikai módszere nem számít szárításnak. A szárítási folyamatok alapelvei és jelenségei általában függetlenek a felhasznált energia típusától. A szárítás során az energiafogyasztás jelentős része folyékony víz bepárlásához (2258 kJ/kg 101,3 kPa nyomáson) [3].

A víztelenítési lehetőséget termikus szárításnak nevezzük, amikor egy külső kiegészítő energiaforrás lehetővé teszi a hulladék melegítését [4].

A szárítás folyamata általában a szennyvíz maradék szilárd anyagaiból származó víz elpárolgatására szolgál. Közvetlen hőszárítókban a forró levegő/gáz egy edényen keresztül áramlik, és közvetlenül érintkezik nedves szilárd részecskékkel. A forró levegő és a hideg nedves sűrítmény közötti érintkezés lehetővé teszi a hőenergia átadását, ami a nedves szárítandó anyag hőmérsékletének növekedését és a víz elpárolgását okozza. A forró levegő/gázt szinte bármely hőforrás elő tudja állítani, de leggyakrabban gázt vagy olajat égető kemence állítja elő [5, 6, 7].

A szárított anyagot elválasztják a meleg kipufogógáztól, majd szitálják és feldolgozzák vagy visz-

szavezetik a szárítóba, vagy pedig tároló silókba vezetik. Az elszívott levegőt/gázt lehűtik, és egy részét visszavezetik a szárítóba. A levegő/gáz fennmaradó részét levegőszennyezés-ellenőrző berendezésekben kezelik, majd a légkörbe vezetik. A szárító kipufogógázának visszavezetése három fontos feladatot lát el. Először is, növeli a szárítórendszer teljes hőhatékonyságát, másodszor minimalizálja a kipufogógáz térfogatát, amely levegőszennyezés-szabályozást igényel, harmadszor pedig biztonsági szerepet biztosít a rendszer oxigénkoncentrációjának korlátozásával, amely csökkenti a robbanások kockázatát [5, 8, 9, 10].

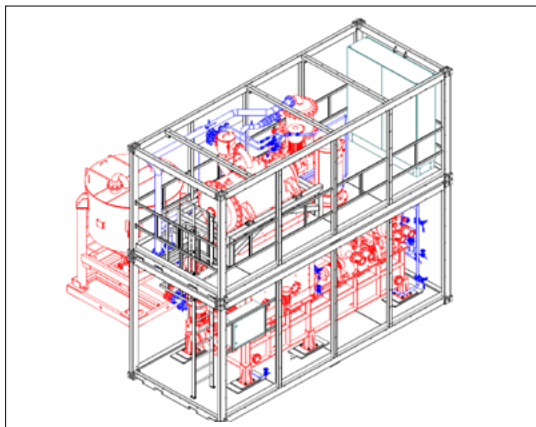
A hőellátás általában tüzelőanyag-égető kemence, de a rotációs dobrendszerrel ellentétben a rendszer hőjét hőfolyadékra, meleg vízre vagy füstgázra cseréli, levegő-hőcserélőre, ahelyett, hogy a kemence közvetlenül a szárítószekrénybe merülne [7].

3. A modul rendszerben kialakított berendezés

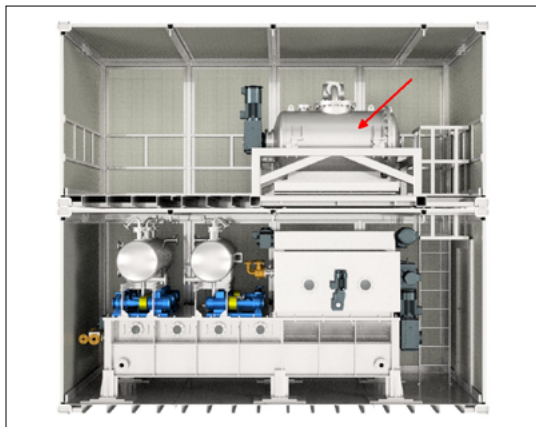
Az elkészült berendezés elvi felépítése az 1. ábrán látható.

A **Vázszerkezet I.** megnevezésű alsó egység egy növelt magasságú 20' HC konténer (hosszúság = 6060 mm, szélesség = 2440 mm, magasság = 2900 mm), míg a felső, **Vázszerkezet II.** egység egy normál magasságú 20'DC (hosszúság = 6060 mm, szélesség = 2440 mm, magasság = 2600 mm) tengeri konténer méreteivel egyezik meg. Az egységek emelését a gyárral azonos kialakításúra tervezett és kivitelezett sarokelemeneken keresztül lehet elvégezni.

Az elkészült berendezés pedig a 2. ábrán látható. A vizsgált tartályt a nyíl mutatja.



1. ábra. A vázszerkezet elvi ábrája



2. ábra. Az elkészült szárítóberendezés

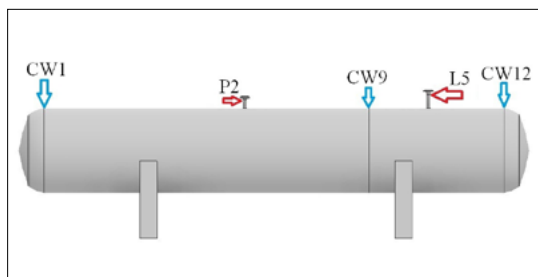
4. A tartály bemutatása és az anyagvizsgálatok célja

4.1. A nyomástartó berendezések hegesztett kötéseinek vizsgálata és technológiai értékelése

A nyomástartó berendezések hegesztett kötéseinek tervezése és kivitelezése az ipari gyártás egyik legkritikusabb területe, mivel a szerkezet üzemi biztonsága, élettartama és megbízhatósága döntően a hegesztési varratok minőségétől függ. A vizsgálat tárgyát képező CW1, CW12, CW9, L5 és P2 jelű varratok esetében több olyan tényező merült fel, amely indokoltá tette a hegesztéstechnológia gondos meghatározását, valamint a kötések komplex ellenőrzését. A varrat térkép a **3. ábrán** látható.

A vizsgált tartálytest P355GH nyomástartó acélból készült, míg a kapcsolódó csomópontok anyaga S355J2 szerkezeti acél volt. A legfontosabb tervezési kérdést a megfelelő hegesztési eljárás kiválasztása jelentette. A CW1, CW12 és CW9 jelű, nagy anyagvastagságú, jelentős igénybevételnek kitett kötések esetében a fedett ívű hegesztés bizonyult optimálisnak, mivel nagy beolvadási mélységet, nagy termelékenységet és jó varrat tisztaságot biztosít. A technológia alkalmazásakor azonban különös figyelmet kellett fordítani az illesztési pontosságra, a huzalelektroda és a fedőpor kiválasztására, valamint a hőbevitel okozta maradó feszültségek és alakváltozások minimalizálására.

Az L5 és P2 jelű, kisebb anyagvastagságú, fokozott esztétikai és minőségi követelményeket támasztó kötések esetében a volfrámelektrodás, semleges védőgázos ívhegesztés alkalmazása bizonyult célszerűnek. Az eljárás előnye a pontos varrat kialakítás és a kis hőbevitel melletti kiváló kötésminőség. Hátrányai – a kisebb hegesztési sebesség és a nagyfokú kezelői szaktudásigény – ellenére a minőségi követelmények indokolták a TIG-hegesztés választását.



3. ábra. A varrat térkép a vizsgált tartály 3D-s modelljén

4.2. A kötésekkel szemben támasztott követelmények

A hegesztett kötések tervezésénél az alábbi fő követelmények érvényesültek:

Szilárdsági követelmények: A kötések mechanikai tulajdonságainak (szakítószilárdság, folyáshatár) el kellett érniük az alapanyag paramétereit, összhangban a vonatkozó szabványokkal.

Anyagminőségi követelmények: Az S355J2 és P355GH anyagok összehegesztése során kiemelt figyelmet kellett fordítani a hőhatásövezet szerkezeti stabilitására, szemcsefinomodásra és a repedésképződés elkerülésére.

Változó anyagvastagságok kezelése: Az eltérő falvastagságok megfelelő hőbevitel- és varratgeometria-tervezést igényeltek, a maradó feszültségek és vetemedés minimalizálása érdekében.

E tényezők mindegyike közvetlenül befolyásolta a technológiai paraméterek meghatározását, valamint a szükséges ellenőrzési és vizsgálati eljárások kiválasztását.

4.3. Vizsgálati módszerek és indoklásuk

A technológiai megfelelés igazolására a kötések mechanikai és nemroncsoló vizsgálatokon estek át.

Mechanikai vizsgálatok: szakító-, hajlító- és Charpy-féle ütővizsgálatok a szilárdság és szívósság értékelésére.

Keménységmérés: Vickers-eljárással, a hőhatásövezet keménységének meghatározására.

Roncsolásmentes vizsgálatok: radiográfiai vizsgálat a belső varrathibák detektálására.

5. Anyagvizsgálatok

A vizsgálatok során minden mérést hétszeres ismétléssel az MSZ EN ISO 9015-1:2011 szerint végeztünk el. Az így kapott adatsorok kiértékelésekor a két szélsőértéket elhagytuk, így a középső öt mérési eredmény átlaga szolgált az értékelés alapjául. Ezzel a módszerrel minimalizálható a mérési hibák és a véletlenszerű szórások hatása, ezáltal pontosabb képet kaphattunk a vizsgált varratok tényleges mechanikai tulajdonságairól. A mérések elsődleges célja a hegesztések minőségének ellenőrzése volt. Ennek érdekében a vizsgálatokat azokon a varratokon végeztük el, amelyek a szerkezet szempontjából kritikusnak tekinthetők. Összesen öt varrat – CW1, CW12, CW9, P2 és L5 – került értékelésre. A kiválasztás alapját az jelentette, hogy ezek a varratok a tervezett berendezés legnagyobb igénybevételnek kitett részein helyezkednek el, így minőségük közvetlen hatás-

sal van az üzembiztonságra és a hosszú távú megbízhatóságra. A CW1, CW12 és CW9 jelű varratokat fedett ívű hegesztési eljárással készítették, 30 mm-es anyagvastagság mellett, P355GH alapanyagon. Ezek a varratok a nyomástartó berendezés nagy falvastagságú, erősen terhelt részein találhatók, ezért kiemelten fontos volt a minőségük részletes ellenőrzése. A másik két vizsgált varrat, az L5 és P2, TIG-eljárással készült S355J2 acélon, 15 mm-es anyagvastagság mellett. Ezek a varratok szintén kritikus helyeken helyezkednek el, így bevonásuk a vizsgálatba elengedhetetlen volt.

5.1. Vickers-keménységmérés

A 4. ábrán látható a mért pontok helyzete, amely a mérések eredményeit mutatja, láthatók a mérési pontok elhelyezkedései, illetve az ezekhez tartozó keménységi értékek. Ezek az adatok grafikus formában szemléltetik a hegesztett varratok keménységi eloszlását a különböző területeken, így lehetővé téve az anyag tulajdonságai térbeli változásainak pontosabb megértését.

Az alkalmazott berendezés digitális Vickers-keménységmérő 8~2900HV – Insize mérőgép. A mérést 20 °C-os közegben, 65% páratartalom mellett végeztük, MSZ EN ISO 6507-1, illetve MSZ EN ISO 9015-1 szabványoknak megfelelően, amelyek biztosították, hogy a környezeti feltételek optimálisak legyenek a pontos és megbízható keménységvizsgálathoz. A vizsgálatban részt vevő hegesztési varratok között a P2 és L5 varratok TIG-eljárással készültek, míg a többi varrat fedőporos hegesztési eljárással.

Az 5. ábra a keménységi mérések trendjét mutatja be, szemléletesen ábrázolva a különböző hegesztési varratokon mért keménységi értékek alakulását. A grafikon alapján jól megfigyelhető, hogy az egyes varratok bizonyos mértékben eltérnek egymástól, ami több tényezőre vezethető vissza. Ezek közé tartozik egyrészt az alkalmazott hegesztési eljárás típusa (fedett ívű vagy TIG), másrészt az eltérő anyagvastagságok és az ezekből adódó hőbevitel, amelyek közvetlen hatással vannak a varrat és a hőhatásövezet mechanikai tulajdonságaira. A mérési pontok összehasonlítása lehetőséget ad arra, hogy meghatározzuk, mely varratok esetében tapasztalható nagyobb szórás vagy eltérés az átlagértékhez képest.

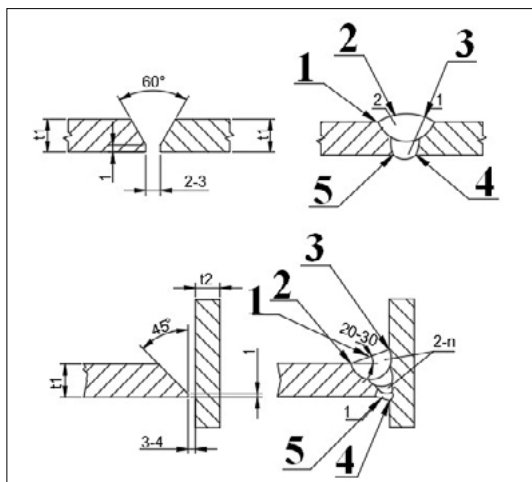
A keménységmérések eredményei minden vizsgált varratnál meghaladják a 150 HV-ot.

Ez azt mutatja, hogy az alkalmazott hegesztési technológia alkalmas a feladat ellátására. A P2 és CW1 varratok esetében tapasztalt nagyobb szórás valószínűleg a varratképződés közben bevitt má-

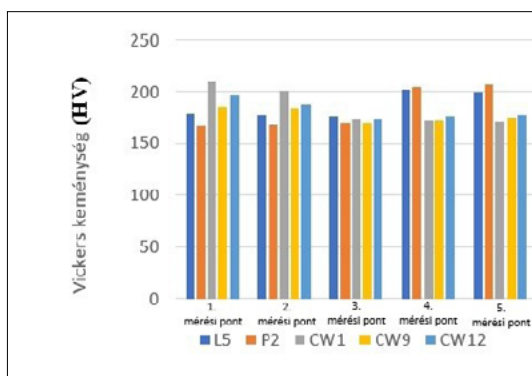
sodlagos ötvözők hatására vezethető vissza, azonban ez a minőséget nem befolyásolja. A többi varrat kiegyensúlyozottabb keménységeloszlást mutatott, ami tovább erősíti a technológia megbízhatóságát.

5.2. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálat (MSZ EN ISO 6892-1:2020) során egy P355GH és S355J2 anyagminőségű acélból készült, hegesztett próbatestet (6. ábra) vizsgáltunk.



4. ábra. A keménységmérési pontok általános helyzete



5. ábra. A keménységmérés eredményei



6. ábra. A szakítópróbatest

A vizsgálatot szobahőmérsékleten végeztük, általában 20–23 °C között. A vizsgálat során rögzítettük a maximális szakítószilárdságot (R_m), amely azt az erőt jelzi, amelyet a próbatest elviselt a törésig. Ezen kívül mértük a folyáshatárt (R_{eH} vagy R_{eL}).

Mérésre használt gép: a Servo-Plus automata szabályozású, univerzális négyoszlopos szakítógép és törőgép.

5.2.1. Szakítószilárdság

A 7. ábra szemléletesen mutatja be a szakítószilárdsági vizsgálatok eredményeit grafikus formában.

A szakítóvizsgálati eredmények szerint az öt vizsgált hegesztési varrat átlagos szakítószilárdsága mindegyik esetben meghaladja az 500 N/mm²-t. Az L5 varrat átlagos szakítószilárdsága 515,8 N/mm², míg a P2 varrat 523,7 N/mm²-t mutat. A CW1 varrat szakítószilárdsága 519,9 N/mm² átlagos értékű, míg a CW9 és CW12 varratok esetében ez 518,9 N/mm² és 522,2 N/mm².

Az L5 varratnál a szórás 4,41 N/mm², míg a P2 varratnál 3,09 N/mm², ami mindkét esetben 1%-os szórás jelent. A CW1, CW9 és CW12 varratok szórása szintén 1%-os, ami szintén kedvező mutató. Az összes varrat tehát nemcsak hogy megfelel a minimális követelményeknek, hanem a szórásalapú elemzés is azt mutatja, hogy az eredmények konzisztensek és megbízhatóak.

5.2.2. Felső folyáshatár

A 8. ábra szemléletesen mutatja be a felső folyáshatár mérési eredményeit grafikus formában.

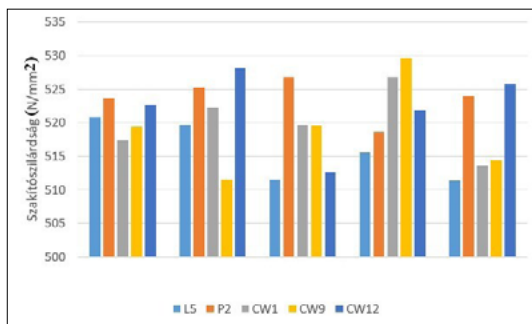
A felső folyáshatár vizsgálati eredményei alapján az öt vizsgált hegesztési varrat átlagos értékei mind meghaladják a 490 N/mm²-t. Az L5 varrat esetében az átlagos felső folyáshatár 506,1 N/mm², míg a P2 varrat 502,4 N/mm²-t mutat. A CW1 varratnál az átlag 505,4 N/mm², amely szintén megfelel a követelményeknek, míg a CW9 varrat 500,4 N/mm² és a CW12 varrat 499,3 N/mm² értéket mutat, ami szintén kedvező.

Az L5 varratnál a szórás 3,29 N/mm², a P2 varratnál 5,55 N/mm², míg a CW1 varratnál 5,29 N/mm², ami 1%-os szórást eredményez mindegyik esetben. A CW9 és CW12 varratok szórása szintén 1%-os, 3,53 N/mm² és 5,11 N/mm² értékekkel.

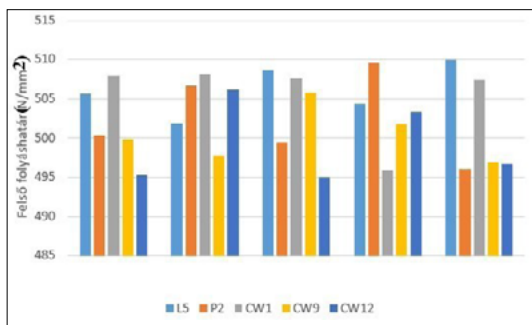
Összességében megállapítható, hogy a mért értékek minden esetben meghaladják a minimális elvárásokat, és a szórásértékek kicsi volta a vizsgálati eljárás következetességét és megbízhatóságát tükrözi.

5.2.3. Alsó folyáshatár

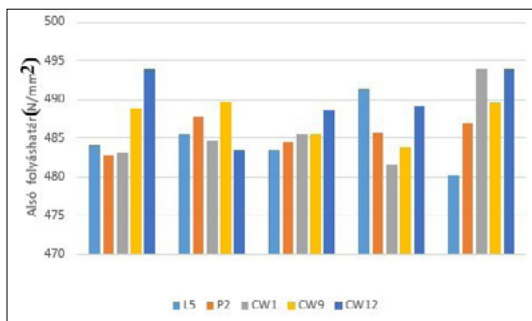
A 9. ábra szemléletesen mutatja be az alsó folyáshatár mérési eredményeit grafikus formában. A vizsgálat során mért alsó folyáshatárértékek alapján az öt vizsgált hegesztési varrat átlagos alsó folyáshatárértékei szintén megfelelnek a 480 N/mm²-es elvárásnak. Az L5 varrat átlagos alsó folyáshatára 484,9 N/mm², míg a P2 varrat 485,5 N/mm²-t mutat. A CW1 varrat esetében az átlagos érték 485,7 N/mm², a CW9 varratnál 487,5 N/mm², a CW12 varrat pedig 489,8 N/mm² értéket mutat.



7. ábra. A szakítószilárdság mérési eredményei



8. ábra. A felső folyáshatár mérési eredményei



9. ábra. Az alsó folyáshatár mérési eredményei

A mérések szórása kicsi, jelezve a mérések stabilitását és megbízhatóságát. Az L5 varratnál a szórás 4,08 N/mm², a P2 varratnál 2,01 N/mm², míg a CW1 varratnál 4,80 N/mm². A CW9 és CW12 varratok szórása 2,71 N/mm² és 4,39 N/mm², ami szintén kedvező.

5.2.4. A kontrakciós szilárdság

A **10. ábra** szemléletesen mutatja be a kontrakciós szilárdság (kontrakciós szilárdság alatt azt az anyagvizsgálati jellemzőt értjük, amely megmutatja, hogy az anyag mekkora valódi feszültséget képes elviselni a szakadás pillanatában, figyelembe véve a keresztmetszet csökkenését a törés előtt) mérési eredményeit grafikus formában.

A CW1 varrat átlagos kontrakciós szilárdsága 775,78 N/mm², a CW9 varrat 736,80 N/mm², a CW12 varrat pedig 740,08 N/mm²-t mutat.

Az L5 varratnál a szórás 40,48 N/mm², míg a P2 varratnál 23,39 N/mm², amely kedvező stabilitást mutat. A CW1 varrat szórása 15,53 N/mm², a CW9 varratnál 15,14 N/mm², míg a CW12 varrat 28,21 N/mm²-es szórása szintén elfogadható. Összességében megállapítható, hogy a kontrakciós szilárdság értékek minden esetben jelentősen meghaladják a minimális elvárásokat, és a szórásértékek kicsi volta a vizsgálati eljárás következetességét és megbízhatóságát tükrözi. Az eredmények alapján a hegesztési varratok mechanikai teljesítménye kiválónak tekinthető.

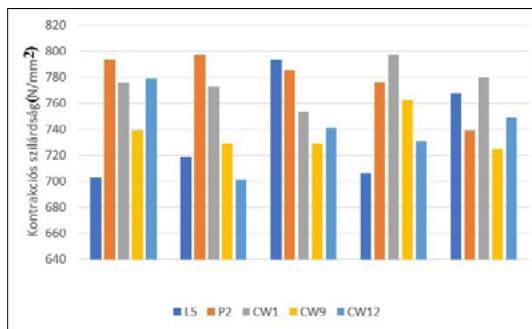
5.3. A Charpy-féle ütővizsgálat

Az ütővizsgálattal (MSZ EN ISO 148-1:2022) a hegesztési varratok törésállóságát és az anyag energiaelnyelő képességét mértük különböző anyagvastagságú mintákon, amelyeket szabványos körülmények között teszteltünk Hoytom ingás ütőmű segítségével. A próbatesteket előre meghatározott módon készítettük el, és az ütővizsgálatnál a szabványoknak megfelelően jártunk el. A kapott eredményeket a **11. ábrán** mutatjuk be.

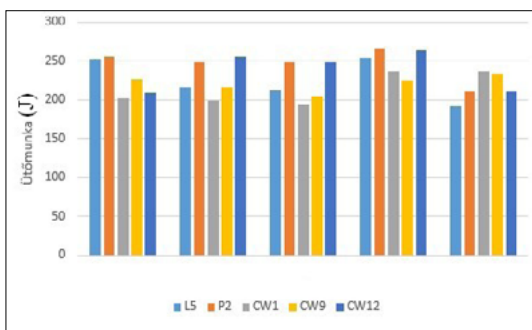
A mérések szórása az egyes varratoknál eltérő, a legnagyobb szórás 27,4 J az L5 varratnál, míg a legkisebb 10,8 J a CW12 varrat esetében. A százalékos szórás 5% és 12% között mozog, ami viszonylag kicsinek számít, jelezve, hogy a mérések stabilak és konzisztens eredményeket adnak.

5.4. Radiográfiai vizsgálat

A vizsgálat célja a hegesztett kötések minőségének ellenőrzése volt, különös tekintettel a belső hibák mint zárványok és repedések feltárására. Egy ilyen vizsgálat kiértékelési szakasza a **12. ábrán** látható.



10. ábra. A kontrakciós szilárdság mérési eredményei



11. ábra. A Charpy-féle ütővizsgálat mérési eredményei



12. ábra. A röntgenfilmek kiértékelése

A 12. ábrán egy ilyen röntgenfilm kiértékelése látható. Az elkészült filmek alapján a vizsgált varratok mindegyike kifogástalan állapotban van. A felvételeken semmilyen hiba, mint például repedés, gázzárvány nem található. A varratok illeszkedése és a hegesztés minősége teljes mértékben megfelel. Ezek az eredmények nemcsak egyetlen varrat esetében figyelhetők meg, hanem az összes, vizsgálat alá vont varratnál is, amelyek egyaránt hibátlanok. A radiográfiai vizsgálat során felmerülő hibamentesség rendkívül fontos, mivel az esetleges hibák, anyaghiányok hosszú távon jelentős problémákat okozhatnak a szerkezet stabilitásában és megbízhatóságában.

6. Összefoglalás

A szárítás folyamata általában a szennyvíz maradék szilárd anyagaiból származó víz elpárologtatására szolgál. A szárítórendszer a szárítón kívül általában anyagmozgató és -tároló berendezésekből, hőtermelő és hő adó berendezésekből, légmozgató és elosztóberendezésekből, kibocsátáscsökkentő berendezésekből és kiegészítő rendszerekből áll. A berendezésünk egy több részből álló összeállított szárítóberendezés, melynek van egy ún. előszárító része és egy főszárító része. Előbbi feladata, hogy a kezelendő anyagot (~ 80% nedvességtartalmú) kis rétegvastagságban felhordva előmelegítse, ill. előszárítsa. Utóbbi feladata, hogy az anyagot a kívánt ~ 20% nedvességtartalomig szárítsa.

6.1. Technológiai koncepció és értékelés

A vizsgálatok célja annak igazolása volt, hogy a fedett ívű hegesztés és a volfrámelektrodás védőgázos ívhegesztés (TIG) egyaránt megfelel a szerkezeti igénybevételeknek és az anyagminőségi követelményeknek. A technológiai koncepció kialakításakor első lépésben az eltérő anyagminőségű elemekhez (P355GH és S355J2) a falvastagságnak megfelelő hegesztési eljárást választották ki. A hőbevitel optimalizálása döntő jelentőségű volt a hőhatásövezet tulajdonságainak megőrzése és a maradó feszültségek mérséklése szempontjából. A varratgeometria és a hegesztőanyagok (védőgáz, fedőpor) megfelelő kiválasztása tovább javította a kötés szilárdságát és repedésállóságát.

A laboratóriumi vizsgálatok eredményei igazolták, hogy a kiválasztott technológiai paraméterek mind gyártástechnológiai, mind üzemi szempontból megfelelnek. A kötések mechanikai tulajdonságai elérték, illetve több esetben meghaladták az előírt értékeket, a roncsolásmentes vizsgálatok pedig hibamentes varratszerkezetet igazoltak.

7. Következtetések

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a fedett ívű hegesztés a nagy falvastagságú elemek, míg a TIG-eljárás a vékonyabb, precíziós kötések esetében biztosította az optimális minőséget. A komplex vizsgálati módszertan alkalmazása lehetővé tette a technológia teljes körű validálását, ami alapvető feltétele a nyomástartó berendezések biztonságos üzemeltetésének.

Köszönetnyilvánítás

A 2019-1.1.1-PIACI-KFI -2019-00320. számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2019-1.1.1-PIACI-KFI pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kaszáné Kiss M.: *Hulladékgazdálkodás. Debreceni Egyetem*, Debrecen, 2003.
- [2] Szira Z.: *A települési szilárd hulladék keletkezésének összefüggésvizsgálata, valamint az önkormányzatok által biztosított hulladékezelési közszolgáltatások elemzése Pest megyében. Doktori értekezés. Szent István Egyetem*, 2010.
- [3] Hii C. L., Jangam, S. P. Ong, A. S. Mujumdar: *Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations*, 2012.
- [4] Yuan J., Zhang D., Li Y. et al.: *Effects of adding bulking agents on biostabilization and drying of municipal solid waste*. Waste Manage., 62. (2017) 52–60.
- [5] Water Environment Federation. Residuals and Biosolids Committee Bioenergy Technology Subcommittee. Fact Sheet: Drying of wastewater solids. January 2014. [Internet]
- [6] Dhaundiyal A., Toth L.: *Thermo-economic assessment of a bench-scale pyrolysis unit through a process simulator*. Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biopr 17. (2023) 1681–1697.
- [7] Virág S., Montvajszki M., Korzenszky: *Termikus hulladékezelési eljárások*. Szarvas, 2015. TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0015 projekt: Alap kutatás fejlesztés a Szent István Egyetem Pirolyzís Technológia Központjában.
- [8] <https://www.limehungary.hu/dobszaritok/>
- [9] Lányi K., Molnar E., Vanó I., Korzenszky P.: *Looking Behind The Process of Pyrolysis in Waste Management: Questions on The Composition and Quality of End-Product and Their Answers by Meas of Analytical Chemistry*. Hungarian Agricultural Engineering, 26. (2014) 25–28.
- [10] Korzenszky P., Lányi K., Simándi P.: *Test Results of a Pyrolysis Pilot Plant in Hungary*. Hungarian Agricultural Engineering, 28. (2015) 48–52.



A robbantásos plattírozás anyagtudományi kérdései

Materials Science Issues in Explosive Cladding

Kovács Tünde Anna¹

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

Abstract

Cladding is a widespread technology with several well-known process types. During the explosive cladding process, the specification requires knowing the parameters of the selected baseplate, cladding plate and the expected joint. For the technological parameter specification, it is necessary to understand the material structure modification and its causes under the explosive cladding process. The plastic deformation even causes macro- and microstructural changes in the case of static but more in the case of dynamic, high-rate deformation. Microstructural changes are the lattice transformation and the cohesion joint established between the metallic atoms, and macrostructural changes are the grain deformation. The explosive cladding process affected structural results, depending on the used material crystal structure, chemical composition and the applied explosive material properties.

Keywords: *cladding, work hardening, explosion welding.*

Összefoglalás

A plattírozás elterjedt technológia, melynek az ipari gyakorlatban számos változata ismert. A robbantásos plattírozás technológiai tervezése során figyelembe kell venni a kiválasztott alaplemez és borító lemez, valamint az elvárt kötés tulajdonságait. A megfelelő technológiai paraméterek kiválasztásához ismerni kell a robbantásos plattírozás során várható mechanikai tulajdonságokat meghatározó anyagszerkezeti változásokat és ezek okait. A keletkező képlékeny alakváltozás statikus kis sebességű alakítás, de a robbantás dinamikus, nagy sebességű alakítása során is okoz makro- és mikroszerkezeti változásokat. Mikroszerkezeti változás a kristályrács torzulása, atomok között létrejövő kohéziós kötés, míg makroszerkezeti változás a szemcsedehormáció. A robbantásos plattírozási technológia hatására bekövetkező eredmények függenek az alkalmazott anyagok kristályszerkezetétől, kémiai összetételétől, valamint a robbanóanyag jellemzőitől.

Kulcsszavak: *plattírozás, alakítási keményedés, robbantásos hegesztés.*

1. Bevezetés

A robbantásos plattírozás egy olyan hegesztési eljárás, ami a robbanás lökéshullámaint használja fel a plattír- vagy repülőlemez alaplemezhez kapcsolásához [1]. A robbantásos plattírozás, szemben a hengerléses plattírozással, nem követel nagy méretű hengerművet vagy egyéb gyártóberendezést. Emiatt igen tág lehetőséget ad a különböző anyagminőségek és lemezvastagságok tekintetében, de természetesen a technológiai alkalmazhatóságának vannak korlátai. A szakirodalom általában az alkalmazott anyagpárosítások esetén alkalmazott paraméterekre és az elért

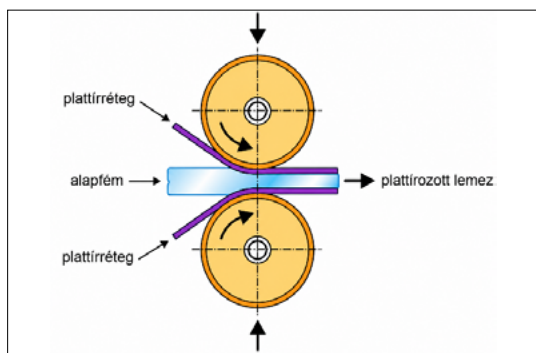
mechanikai tulajdonságokra koncentrálnak. Számos esettanulmány érhető el, jellemzően az acél-réz, acél-alumínium stb. anyagpárosításokat illetően. Kiemelten fontos a technológiában alkalmazott robbanóanyagok köre és ezek tulajdonságainak ismerete [2]. Az eljárás egyik korlátja is a robbantási sebesség, ami nem haladhatja meg az anyagban a hang sebességét [1, 3]. A túl nagy sebességű robbanás lökéshulláma károsodást okozhat. Az irodalomban található információk alapján gyakran nehéz a kísérleteket reprodukálni a robbanóanyagok széles választéka és eltérő jellemzőik miatt. A robbanóanyagokat általában kémiai ösz-

szétételükkel, sűrűségükkel és robbantási sebességükkel adják meg. A robbantásos plattírozás technológiai tervezése során kardinális az alkalmazott robbanóanyag mennyiségének meghatározása. Az ipari robbanóanyagok kezelésbiztosak, ami azt jelenti, hogy csak nagy sebességű detonátorral indítható a robbantás. A robbanás viszont nem halad végig a munkadarab teljes felületén, amennyiben a robbanóanyag mennyisége túl kevés. Így a méretezés során ezt a korlátot is figyelembe kell venni [4]. A plattírozási technológia egy felrakási eljárás, az anyag felületére egy eltérő anyagú réteget visznek fel a felületre. A kötés kialakítása során a fémek között közvetlen atomi kapcsolat, kohéziós kötés jön létre. Ennek megvalósítására több eljárás is ismert és alkalmazott az ipari gyakorlatban. A plattírozással létrehozott anyagkombinációk számos előnyös tulajdonságot hordoznak, ezért alkalmazásuk előnyös. Ilyen tulajdonságok lehetnek a felület korrózióállóságának, kopásállóságának növekedése, kis szilárdságú alaplemez szilárdságnövelése a felrakott réteg hatására.

Ebben a munkában a fémlemezek felületére kohéziós kötés kialakításával létrehozott plattírréteg és alapanyag tulajdonságainak elemzésére kerül sor.

1.1. Plattírozás hengerléssel

A hengerléses plattírozás az egyik legelterjedtebb plattírozási eljárás. A technológia során alkalmazott hőmérséklet szerint lehet hideg- vagy melegplattírozás. A hidegplattírozás előnyei a kiváló ismételhetőség, pontosság, méretezhetőség, széles anyagpárosítási lehetőségek a tömeggyártásban. Jellemző anyagpárosítások: réz–acél, alumínium–acél, réz–alumínium. A melegplattírozó eljárás során az anyagpárokat összeállítják, vákuumban a hengerlés hőmérsékletére hevítik, majd összehengerlik (1. ábra).



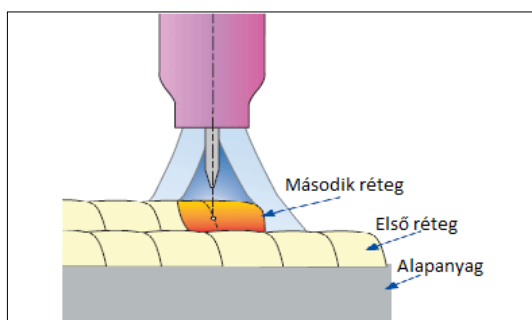
1. ábra. Plattírozás hengerléssel

1.2. Plattírozás felrakóhegesztéssel

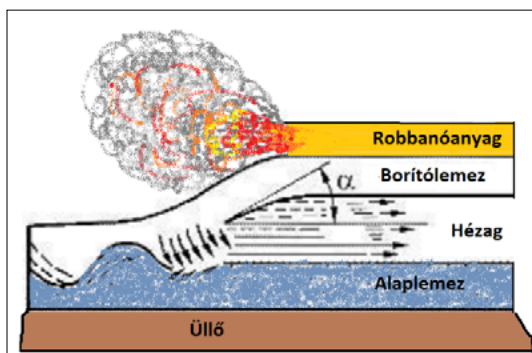
A felrakóhegesztéssel történő plattírozást különböző ömlesztőhegesztési eljárásokkal lehet elvégezni. Az ömlesztőhegesztés sajátosságából eredően ennél az eljárásnál az alaplemez és a rá felhegesztett réteg keveredik. A megfelelő fedőréteg-tulajdonságok elérése érdekében több réteget hoznak létre. A 2. ábra a felrakóhegesztést mutatja be volfrámelektrodás védőgázos ívhegesztéssel.

1.3. Plattírozás robbantással

A robbantásos plattírozás is hegesztésnek tekinthető, de ebben az esetben sajtolóhegesztési eljárásról beszélünk, mivel a kötés kialakításában nem a hő hatása dominál. A robbantás során keletkező lökéshullám nagy sebességgel kapcsolja össze a borítólemezt az alaplemezzel. A robbantásos plattírozás párhuzamos elrendezését a 3. ábra mutatja be. Az alaplemez és a borítólemez közötti hézag teszi lehetővé, hogy a borítólemez rácsapódjon az alaplemezre. A robbantásos plattírozás során alkalmazott robbanóanyag lökéshullámának sebessége 3000–5000 m/s, mivel nagyobb sebesség esetén az anyagok károsodhatnak. A robbantást detonátor segítségével indítják el.



2. ábra. Plattírozás felrakóhegesztéssel



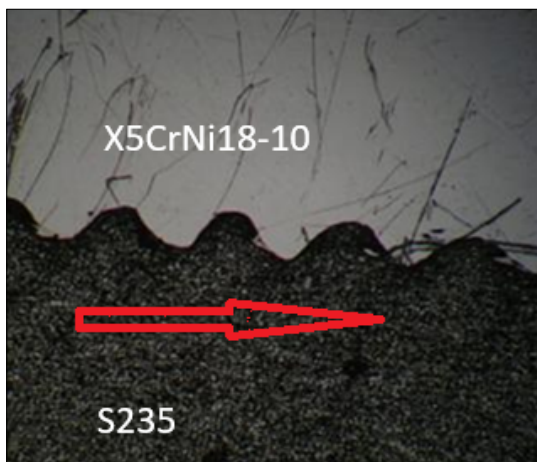
3. ábra. A robbantásos plattírozás illusztrációja

2. A robbantásos plattírozás elemzése

2.1. A robbantásos plattírozás technológiája

A robbantásos plattírozás során az alaplemezzel nagy sebességgel ütközik a borítólemez. A borítólemezt a robbanás lökéshulláma alakítja az alaplemez felületére, jellegzetes hullámos kötésgeometriát kialakítva (4. ábra), ahol a nyíl a robbantás irányát jelöli. Az összecsapódás képlékeny alakváltozást és ezzel keménységnövekedést okoz. Megfigyelhető, hogy bár az alakváltozás mértéke kicsi, a kötésben jelentős keménységnövekedés jön létre. Az alakváltozás sebessége sokkal nagyobb, mint a hagyományos képlékenyalakítási technológiáknál.

A robbantásos plattírozás során hő keletkezik, de ez nem okozza a fémek megolvadását. A robbanásból létrejövő gáznyomás a folyáshatár feletti feszültséget létrehozva kapcsolja össze képlékenyen a fémeket. Mivel a robbantási nyomás közvetlenül a borítólemezt alakítja, ezért szerencsés, ha kis folyáshatárú, jó alakváltozó képességű borítólemezt alkalmaznak. Abban az esetben, ha a robbanóanyag robbantási sebessége nagy, a robbanóanyag és a borítólemez közé csillapítólemez helyeznek. A borítólemez és az alaplemez közötti hézag meghatározása a technológiai tervezés fontos lépése. A hézag méretének meghatározásában számos kutatási eredmény található. Egyes kutatók szerint a hézag mérete a borítólemez vastagságának fele, míg más kutatók eredményei szerint 1,0–1,5-szerese [5–8]. Azt mindenképpen meg kell állapítani, hogy a kötésben létrejövő alakítási keménységnövekedés ettől a paramétertől jelentősen függ [5, 6].



4. ábra. Robbantásos plattírozással létrejött kötés szövetszerkezete

A robbanóanyag vastagságának (l_b) meghatározásához ismerni kell a borítólemez sűrűségét (ρ_b), vastagságát (l_b), valamint a robbanóanyag sűrűségét (ρ_e).

A méretezés alapja, hogy a robbanóanyag (M_b) és a borítólemez anyagának (M_e) fajlagos tömegaránya $0,5 < Q < 1,5$ legyen [7]. A tömegarány a robbanóanyag és a borítólemez sűrűségéből és térfogatából számítható (1).

$$Q = \frac{M_b}{M_e} \quad (1)$$

ahol M_b a borítólemez tömege, M_e pedig a robbanóanyag tömege.

Mivel a robbanóanyag a borítólemezrel azonos felületen helyezkedik el, így csak a vastagságát kell meghatározni az alábbi (2) összefüggéssel.

$$l_e = \frac{\rho_b \cdot l_b}{\rho_e} \quad (2)$$

Szükséges paraméter továbbá a hézag meghatározása, amit a borítólemez vastagsága alapján választanak meg a gyakorlatban. Ennek számítására pontos összefüggés a szakirodalomban nem található.

2.2. A robbantásos plattírozás anyagszerkezeti hatásai

A párhuzamos elrendezésnél alkalmazott hézag annak ellenére, hogy erre nem határoztak meg pontos összefüggést, kiemelt fontossággal bír a kialakuló kötés tulajdonságainak szempontjából. A gyakorlatban a hézag méretére a borítólemez vastagságának felétől a másfélszereséig számos kísérleti eredményt publikáltak [1, 3, 5, 8].

A hézag mérete azért kiemelten fontos, mert a robbanáskor ez az az úthossz, amit a borítólemez megtesz a becsapódásig. Mérési eredmények azt mutatják, hogy a kötésben létrejövő keménységnövekedés a hézagnövekedéssel növekszik [5, 6]. A hézag 10 mm-ig történő növelésével az X5CrNi18-10 acél alaplemez keménysége eléri a 348 HV30 keménységet a kötésben, míg eredeti keménysége 200 HV30 [5, 6]. Ahol az alkalmazott robbanóanyag (PERMON 10T) sebessége 3200 m/s, sűrűsége 850 kg/m³ volt [5].

Ismert, hogy az ausztenites acélok felületének középpontos köbös rács típusa alakítás hatására átalakulhat tetragonális szerkezetűvé, ami egy martenzites fázisátalakulás. A martenzit nagy keménységet és mágneses tulajdonságot mutat. A rácsstorzulási jelenséget más, felületen köbös kristályrácsú ötvözeteknél (Cu₂Be) is megfigyelték [7, 9, 10]. A szintén felületcentrált köbös rács

szerkezetű Hadfield-acélok nál a gyakorlatban vasúti váltók felületének keményítésére alkalmazott eljárás a robbantásos keményítés, ami a plattírozással azonos elvű eljárás. A Hadfield-acél alakításra fázisátalakulást mutat, ami keménységnövekedéssel jár [6]. Az alakítás okozta keménységnövekedést egyrészt a fázisátalakulás, másrészt a diszlokációsűrűség növekedése okozza [11, 12, 13, 14]. A képlékeny alakváltozás során az energia jelentős része hővé alakul, a fennmaradó rész pedig a fémbe tárolódik, főként diszlokációk formájában [9].

Makro- és mikroszerkezeti változások jönnek létre a plattírozott kötésben a nagy energiájú alakítás hatására [12, 13, 14, 15].

A kötés minőségét elsősorban a detonációsebesség, az ütközési sebesség és szög, a robbanóanyag mennyisége, a repülőlemez vastagsága, valamint a lemezek közötti kezdeti távolság határozza meg [8, 9].

A folyamat során a kötési határfelületen rendkívül nagy nyomás, nagy alakváltozási sebesség és rövid idejű hőmérséklet-emelkedés alakul ki. Amikor az ütközési nyomás meghaladja az összekapcsolandó anyagok folyáshatárát, intenzív képlékeny alakváltozás következik be. Ennek egyik jellegzetes következménye a hullámos kötési határfelület, amely a robbantásos plattírozás egyik legfontosabb mikroszerkezeti sajátossága. A határfelület közelében a szemcsék megnyúlhatnak, elfordulhatnak és felaprózódhatnak, miközben a deformáció mértéke a kötési zónától távolodva fokozatosan csökken [8, 9].

A nagy képlékeny alakváltozás hatására az eredeti szemcseszerkezet fokozatosan cellás, szubszemcsés, illetve lamellás deformációs szerkezetté alakulhat. A lapközepes köbös fémek alakváltozását tárgyaló vizsgálatok szerint a szemcséken belül diszlokációs cellák, sűrű diszlokációs falak, mikroövek és geometriailag szükséges diszlokációkból álló határok jönnek létre. Az alakváltozás növekedésével e belső határokat egyre nagyobb orientációkülönbségek választják el, ami a szemcseszerkezet további felosztódásához és finomodásához vezet [10, 13].

A kötési zóna egyik legfontosabb változása a diszlokációsűrűség jelentős növekedése. A sokhullámmal terhelt alumínium atomi skálán végzett vizsgálata azt mutatta, hogy a dinamikus képlékeny alakváltozásban meghatározó szerepet játszik a Shockley-féle parciális diszlokációk keletkezése, valamint a teljes diszlokációk felbomlása. A diszlokációk képződésének sebességét a szemcseméret, a soknyomás és a hullám terje-

dési távolsága egyaránt befolyásolja [4]. A nagy diszlokációsűrűség, a diszlokációk kölcsönhatása és falakba rendeződése növeli az alakváltozással szembeni ellenállást, így alakítási keményedést és a kötési felület közelében helyi keménységnövekedést eredményezhet [10, 13, 14].

A robbantásos plattírozást alapvetően szilárd fázisú eljárásként tartják számon, ezért megfelelő technológiai paraméterek mellett az alapanyagok eredeti fázisszerkezete nagyrészt megmarad. A hullámhegyekben, örvényes tartományokban és lokálisan nagy energiájú ütközési pontokban azonban rövid idejű megolvadás, anyagkeveredés és gyors megszilárdulás következhet be. E területeken új fázisok, köztük intermetallikus vegyületek is kialakulhatnak, különösen olyan, egymástól jelentősen eltérő anyagpárok esetében, mint az alumínium-réz, alumínium-acél vagy titán-acél rendszerek [8, 9]. A vékony és szakaszos reakciózóna hozzájárulhat a metallurgiai kapcsolat kialakulásához, a vastag, összefüggő és rideg intermetallikus réteg azonban csökkentheti a kötés képlékenységet, és elősegítheti a repedések kialakulását.

A mechanikai tulajdonságokat a szemcsefinomodás, a diszlokációsűrűség növekedése, az alakítási keményedés, a maradó feszültségek, a határfelület geometriája és az esetlegesen létrejövő új fázisok együttesen határozzák meg. A TA2 titánötvözet és Q235 acél robbantásos kötésénél a hullámos határfelület kifejezett mikroszerkezeti és mechanikai anizotrópiát mutat. A vizsgálatban 380–410 MPa kvázistatikus, illetve 450–600 MPa dinamikus nyírószilárdságot mértek; a legnagyobb értékeket a határfelületi hullámokhoz viszonyított 90°-os terhelési irányban kapták. A kötés pozitív alakváltozásiszebesség-érzékenységet mutatott, a törés pedig képlékeny és rideg mechanizmusok együttes jelenlétével következett be [15].

3. Következtetések

A robbantásos plattírozás nagy sebességű, szilárd fázisú felrakási eljárás, amelynél a robbanóanyag energiája a repülőlemezt nagy sebességgel az alaplemeznek ütközteti. A megfelelő szögben bekövetkező ütközés során kialakuló anyagáramlás eltávolítja az oxidréteget és a felületi szennyeződések, ezáltal tiszta fémfelületek kerülnek közvetlen, atomi léptékű érintkezésbe. A robbantásos plattírozott kötések deformált zónáinak értelmezéséhez nem csak a közvetlenül a robbantásos plattírozást elemző kutatások, hanem az

intenzíven alakított fémek általános mikroszerkezeti fejlődését leíró eredmények megfelelő elméleti alapot adnak.

Összességében az optimális robbantásos platírozott kötést finomodott és erősen deformált szemcseszerkezet, nagy diszlokációsűrűség, helyi keménységnövekedés és erős kohéziós kötés kialakulása jellemzi. A túlzott ütközési energia ugyanakkor kiterjedt olvadási zónákat, rideg intermetallikus fázisokat, nagy maradó feszültségeket és lokális repedéseket hozhat létre. A technológiai paraméterek megfelelő megválasztásának célja ezért olyan kötési zóna kialakítása, amelyben a deformáció és a szemcsefinomodás kedvező szilárdságnövelő hatása érvényesül, miközben az összefüggő rideg fázisok képződése korlátozott marad [5, 6, 7, 10, 13, 14, 15].

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Findik F.: *Recent developments in explosive welding*. Material Design, 32/3. (2011) 1081–1093. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.017>
- [2] Lucia F., Jangl S., Zvakova Z., Kavicky V.: *Experimental measurements of ANFO explosives*. Explosive Ordnance Disposal Centre of Excellence, NATO, 2016. www.eodcoe.org (letöltve: 2023. július 17.)
- [3] Meyers M. A., Murr L. E.: *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena*. In: Metals, International Conference on Metallurgical Effects of High-Strain-Rate Deformation and Fabrication (szerk. Albuquerque N. M.). 1980. 91–111.
- [4] Lukács L., Szalay A., Zádor I.: *A repülőgépek gyártásánál alkalmazható két- és háromrétegű fémanyagok előállítása robbantásos platírozással*. Repüléstudományi Közlemények XXIV/2. (2012) 447–459.
- [5] Kovács-C. T.: *Explosive Surface Hardening of Austenitic Stainless Steel*. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering, 123. (2016) 1–5. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/123/1/012010>
- [6] Kovács T., Völgyi B., Sikari-Nágl, I.: *Hadfield Steel Hardening by Explosion*. Materials Science Forum, 792. (2014) 93–97. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.792.93>
- [7] Kugyela L., Daruka N., Kovács T. A.: *Explosive Welding of Metals for Electronic Applications*. In: The Impact of the Energy Dependency on Critical Infrastructure Protection (szerk. Kovács T. A., Stadler R. G., Daruka N.). ICCECIP, 2024. Advanced Sciences and Technologies for Security Applications. Springer, Cham., 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-78544-3_35
- [8] Sherpa B. B., Rani R.: *Explosive welding process to clad materials with dissimilar metallurgical properties*. In: Material Flow Analysis, (2021) 1–14. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94448>
- [9] Sherpa B. B., Rani R.: *Advancements in explosive welding process for bimetallic material joining: A review*. Journal of Alloys and Metallurgical Systems, 6. (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2024.100078>
- [10] Hansen N., Jensen D. J.: *Development of microstructure in FCC metals during cold work*. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 357. (2014) 1447–1469.
- [11] Ganin E., Weiss B. Z., Komem Y.: *Martensitic transformation in Cu-2Be alloys induced by explosive cladding*. Metallurgical Transactions A, 17. (1986) 1885–1890. <https://doi.org/10.1007/BF02644986>
- [12] Meyers M. A., Murr L. E.: *Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena*. In: Metals, International Conference on Metallurgical Effects of High-Strain-Rate Deformation and Fabrication. Albuquerque, N. M., 1980. 91–111.
- [13] Agarwal G., Valisetty R. R., Dongare A. M.: *Shock wave compression behavior and dislocation density evolution in Al microstructures at the atomic scales and the mesoscales*. International Journal of Plasticity, 128. (2020) 102678. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2020.102678>
- [14] Hansen N.: *Plastic Behavior of Metals: Large Strains*. In: (Buschow J. K. H., Cahn R. W., Flemings M. C., Ilkschneider B., Kramer E. J., Mahajan S., Veyssiére P.: Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Elsevier, 2001. 7040–7050. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01249-3>
- [15] Zhou Q., Lu H., Lan X., Guo Y., Liu K., Huang G., Jia B., Chen P.: *Anisotropy in microstructure and shear properties of TA2/Q235 explosive welding interfaces*. Journal of Materials Research and Technology, 25. (2023) 6472–6491. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.080>
- [16] Valberg H.: *Formability and workability*. In: Applied metal forming: including FEM analysis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2010. 127–138. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511801907.011>



Kombinált erősítésű csigás íjkar hárompontos hajlítása

Three Point Bending of Hybrid-Reinforced Compound Bows Limbs

Mónus László József,¹ Fábián Enikő Réka²

¹ Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest, Magyarország, monuslaszlojosef@gmail.com

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

Abstract

Glass fibre-reinforced composite limbs for compound bows were developed to improve their mechanical performance through different stacking sequences of glass fibre reinforcements. Three composite bow limb configurations with different lay-up sequences were investigated using three-point bending tests, microscopic analysis, and finite element simulations. The results showed that incorporating woven glass fibre reinforcement into the central region of the laminate significantly increased both the maximum flexural load and the corresponding deflection. The highest bending load-carrying capacity (8,835 N), together with favourable flexural deflection, was achieved by the composite limb reinforced with five layers of unidirectional glass fibre and four layers of glass woven reinforcement. This lay-up also exhibited more favourable damage behaviour than the other stacking sequences examined. The developed composite bow limbs are expected to provide greater resistance to dry-fire loading, thereby improving the operational safety and service life of compound bows.

Keywords: *compound bow limb; glass woven, glass fibre reinforcement; layer order, three-point bending.*

Összefoglalás

A kutatás célja üvegszál-erősítésű, csigás íjkarok mechanikai tulajdonságainak javítása különböző rétegrendű, üvegszálból készült szövetek alkalmazásával. A vizsgálatok során három eltérő rétegrendű kompozit íjkart vizsgáltunk, amelyeket hárompontos hajlítóvizsgálatnak, mikroszkópos vizsgálatnak és végeselem-szimulációnak vetettünk alá. Az eredmények azt mutatták, hogy a darab középső tartományába alkalmazott keresztszövésű üvegszálból készült szövet hatására az elviselt maximális hajlítóerő és a lehajlás is jelentősen nőtt. A legnagyobb terhelőerőt (8835 N) és jó lehajlást az 5 réteg üvegszálból és 4 réteg üvegszálból szőtt szövet erősítéssel készült kompozit íjkarnál értük el. A többrétegű, üvegszál-szövet erősítésű íjkar kedvezőbb károsodási viselkedést mutatott a többi rétegrenddel szemben. A fejlesztett kompozit íjkarok az üresoldás jelensége ellen nagyobb biztonságot és hosszabb élettartamot biztosíthatnak a csigás íjak számára.

Kulcsszavak: *kompozit íjkar, üvegszövet, üvegszál-erősítés, rétegrend, hárompontos hajlítóvizsgálat.*

1. Bevezetés

A modern csigás íjak nagy teljesítményű mechanikai szerkezetek, amelyek működésük során jelentős dinamikus terheléseknek vannak kitéve. Megbízható működésükhöz elengedhetetlen a megfelelő szerkezeti kialakítás, a korszerű anyagok alkalmazása és a szakszerű használat.

A modern csigás íjak jellemzően üvegszál-erősítésű kompozitokból készülnek, amelyek kedvező szilárdság per tömeg arányuknak, nagy fajlagos merevségüknek és jó kifáradási tulajdonságaiknak köszönhetően alkalmasak a működés során fellépő, ismétlődő, dinamikus igénybevételek elviselésére. Az anyagtechnológia és a gyártási

eljárások jelentős fejlődése ellenére a szerkezeti meghibásodások továbbra is előfordulnak a gyakorlatban, amelyek számos esetben a nem megfelelő használatra vezethetők vissza. A különböző meghibásodási mechanizmusok közül az úgynevezett „üres oldás” (dry fire) az egyik legsúlyosabb terhelési állapotnak tekinthető. Üres oldás akkor következik be, amikor az íjat nyílvesztő nélkül engedik el, így a felajzott íjban tárolt rugalmas energia nem tud átadódni a nyílvesztőnek. Ennek következtében a felhalmozott alakváltozási energia rendkívül rövid idő alatt az íj szerkezetére terhelődik vissza, átmeneti feszültség-hullámokat és nagy dinamikus igénybevételeket létrehozva, amelyek jelentősen meghaladhatják a normál lövés során kialakuló terheléseket. Az ilyen szélsőséges igénybevételek még megfelelő biztonsági tartalékkal tervezett szerkezetekben is maradandó károsodást vagy akár törést idézhetnek elő. A gyakorlati megfigyelések alapján a károsodás leggyakrabban az íjkar csiga felőli végén kezdődik, ahol a repedések kialakulnak, majd jellemzően a szálerősítés irányában terjednek tovább. A repedés kialakulása az íjat további használatra alkalmatlanná teszi, és jelentősen növeli az íjászra vonatkozó sérülésveszély kockázatát. Az **1. ábra** a vizsgált csigás íj szerkezeti modelljét mutatja, amelyen a kompozit íjkarok kék színnel vannak kiemelve **[1]**.

2. Anyagok és technológiák

2.1. Anyagvizsgálatok

Annak érdekében, hogy próbaesteket tudjunk készíteni, egy prégépet hoztunk létre, mely segítségével állandó nyomáson, állandó hőmérséklet mellett valósíthattuk meg az adhéziós kötést az epoxigyanta mátrixanyagú, üvegszál-erősíté-

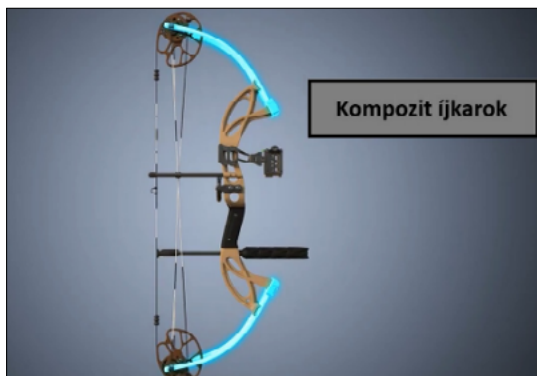
sű kompozit próbatestekben. Szakítóvizsgálatot hajtottunk végre a próbatesteken, mely vizsgálat alatt egyértelműen kiderült, hogy kiemelkedő a szakítószilárdsága a kompozit íjkar próbatesteinknek. A **2. ábrán** látható a prégép a prégésszámmal **[2, 3]**.

A vizsgálat során a próbatesteket erősen ki kellett könnyíteni annak érdekében, hogy elszakadjanak, a szakítószilárdságok kiemelkedőek voltak, a kikönnyítés ellenére is elérték a 650 MPa-t. Ezt követően a különböző rétegrendű próbatesteinken hárompontos hajlítóvizsgálatot végeztünk el a Kermi vizsgálóközpontjában. A hárompontos hajlítóvizsgálatok minden rétegrendű kompozit próbatest esetén a következő vizsgálati tényezők mellett zajlottak:

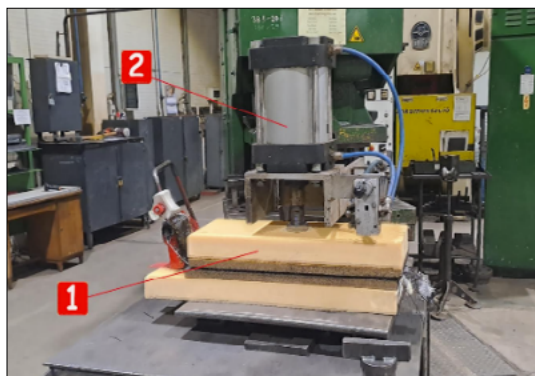
- Hajlítószerszám-sebesség: 2 mm/min.
- A vizsgálat során 250×20×10 mm-es próbatestekkel dolgoztunk.
- Az alátámasztások a próbatest 1/3-ánál voltak, körülbelül 83 mm-re a szélektől.

Kezdetben a nagy gyártók által készített, kizárólag hosszirányú üvegszál-erősítéssel készült próbatesteken végeztük a vizsgálatainkat. Az íjgyártó cégek által készített kompozit próbatesteket P1-es rétegrendű próbatesteknek neveztük el szálerősítésük szerint. A vizsgálatok során azonban a kompozit anyagokhoz viszonyítva is kicsi hajlítóvizsgálati eredményeket kaptunk, a legjobb esetekben is az $F_{\max 1} = 5790$ N, $F_{\max 2} = 5770$ N, míg a maximális hajlítóerő mellett mért maximális lehajlás értékek $dL_1 = 10,6$ mm, illetve $dL_2 = 9,6$ mm **[4]**.

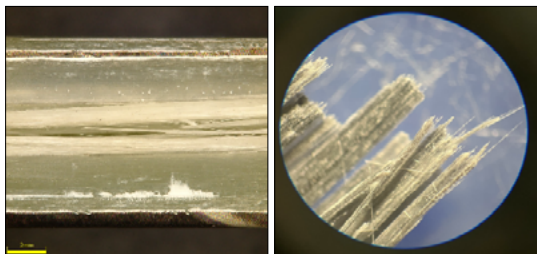
Ami a **3. ábrán** látható mikroszkópképeket illeti, a töretek képein jól megfigyelhető volt, hogy a kizárólag hosszirányú üvegszálakból felépülő üvegszállemezes, P1 rétegrendű próbatestek ridegtörést szenvedtek el, melyek az íjász számá-



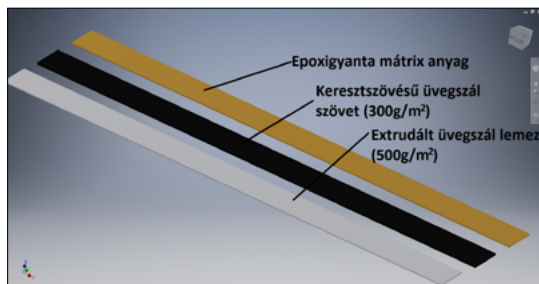
1. ábra. A csigás íj szerkezete és a kompozit íjkarok



2. ábra. A prégésszámm (1) és a prégép (2)



3. ábra. P1 rétegrendű próbatetek mikroszkópos képei



4. ábra. A kompozit próbatetek fő alkotórégei



5. ábra. A P2-es rétegrendű kompozit próbatest szerkezeti felépítése

ra is veszélyt jelenthetnek. A vizsgálatok során számunkra egyértelműen kiderült, hogy hajlító igénybevétellel szemben a P1-es rétegrendű kompozit íjkarok gyengék, így módosított rétegrendű szálérősítéseket alkalmaztunk a továbbiakban. Egy plusz kereszt szövésű üvegszálszövet-réteggel hoztuk létre az adhéziós kötést a P2-es rétegrendű próbatetek esetében. A 4. ábrán láthatók a kompozit próbatetek fő alkotórégei. Az összes általunk készített próbatest epoxigyanta alapú mátrixanyaga azonos volt, minden esetben Araldite AW 106.

Az elkészült P2-es rétegrendű kereszt szövésű üvegszálszövettel erősített kompozit próbatesteket hárompontos hajlítóvizsgálat alá vetettük a kedvezőbb hajlítószilárdsági eredmények reményében. Az új P2-es rétegrendű kompozit próbatetek a P1-es rétegrendűekkel szemben mind a

mért maximális hajlítóerők, mind a maximális hajlítóerőknél mért maximális lehajlások esetén jelentősen jobb eredményeket produkáltak. Az 5. ábrán látható P2-es rétegrendű próbatetek elkészítése során a következő hőkezelési technológiát alkalmaztuk az adhéziós kötés létrehozása során:

- 8 réteg hosszirányú üvegszállemez (500 g/m²)
- 1 réteg kereszt szövésű üvegszálszövet (300 g/m²).
- AW Araldite 106-os kétkomponensű epoxigyanta mátrixanyag.
- A gyantát gyors keverést követően 15 perc alatt szobahőmérsékleten juttatjuk fel az érintett felületekre.
- Az adhéziós kötés kialakítása 6 órán keresztül 3 bar nyomás alatt, 70 °C-on valósult meg, ekkor kedvező az epoxigyanta térhálósodása.

Korábbi kutatásunk során az íjkaron végelem-szimulációkat végeztünk Euler Bernoulli és Timoshenko-féle rúd elméletek segítségével, annak érdekében, hogy következtethessünk, milyen hajlítószilárdságot kell elviselniük a kompozit íjkaroknak az üresoldás pillanatában. Egy speciális mérőberendezés segítségével meghatároztuk, hogy mekkora erő hat az íjkarra.

$$F_{kar} = \frac{F_{hajlító}}{R} = \frac{267N}{0,615} = 434N \quad (1)$$

Végelem-szimulációs vizsgálatok során pedig meghatároztuk az íjkarban kialakuló maximális hajlítófeszültséget, mely 251 MPa volt, valamint a maximális lehajlást, amely 48,5 mm lett esetünkben [5].

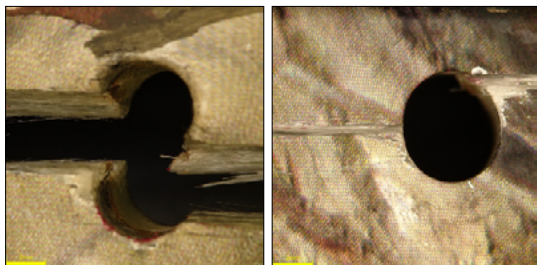
$$\sigma_{max} = \frac{434 N \times 0,25 m \times 0,006 m}{2,592 \times 10^{-9} m^4} = 251 MPa \quad (2)$$

$$\sigma_{max} = \frac{434 N \times 0,25 m \times 0,006 m}{2,592 \times 10^{-9} m^4} = 251 MPa \quad (3)$$

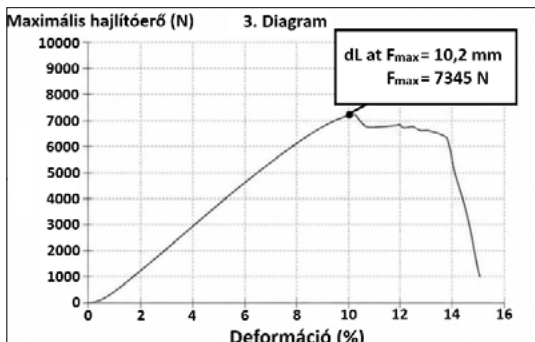
A Timoshenko-rúd elmélet alkalmazását követően meghatároztuk az íjkar sajátfrekvencia-értékeit, mely szerint első sajátfrekvenciája 105 Hz volt [6].

$$f_1 = \frac{1,875^2}{2\pi \times 0,25^2} \sqrt{\frac{18 \times 10^9 \times 2,592 \times 10^{-9}}{1900 \times 2,16 \times 10^{-4}}} = 105 Hz \quad (4)$$

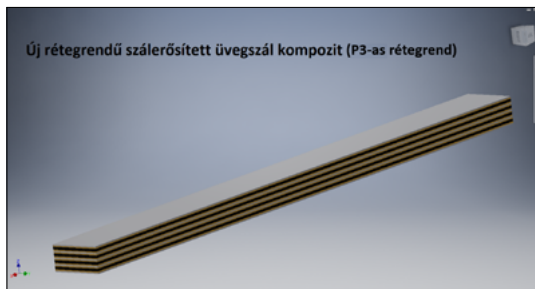
Az íjkar és csiga mechanikus kapcsolatánál, az íjkarban egy kis furatot alakítanak ki (ahogy a 6. ábrán láthatjuk), melyen keresztül kapcsolódik egymással a csigás íj csigája a kompozit íjkarokkal, ezen furat esetén számolnunk kell feszültségkoncentrációs tényezővel, amely a kisebb kör alapú kivágások esetén $K_t = 3$ vagy akár 3,5 [7].



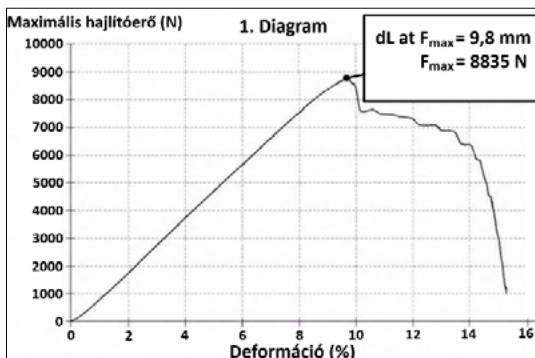
6. ábra. P2 szálerősítésű próbatest töretképei a kivágásnál



7. ábra. P2-es szálerősítésű próbatest hárompontos hajlítóvizsgálati eredménye



8. ábra. P3-as rétegrendű kompozit próbatest szerkezeti felépítése



9. ábra. P3-as szálerősítésű próbatest hárompontos hajlítóvizsgálati eredménye

Ebben az esetben a furat környezetében a 251 MPa helyett akár 850 MPa hajlítófeszültség is koncentrálódhat. Az alábbi mikroszkópképeken látható a P2-es rétegrendű kompozit íjkarok furatánál keletkező hasadás.

3. Vizsgálati eredmények

A P2-es rétegrendű, keresztiszövésű üvegszálszövetet tartalmazó kompozit próbatestek jelentősen ellenállóbbak voltak hajlítással szemben a gyári íjkarokkal összevetve, ezért ezen az úton elindulva készítettünk új próbatesteket annak érdekében, hogy tovább növeljük a kompozit karok hajlítószilárdságát. A 7. ábrán látható a P2-es szálerősítésű, 3-as számú próbatest hárompontos hajlítóvizsgálat eredménye.

A 8. ábrán látható ezen próbatestek szerkezeti felépítése, amely a P3-as rétegrend elnevezést kapta, és a következő módon épül fel:

- 5 réteg hosszirányú üvegszállemez (500 g/m²);
- 4 réteg keresztiszövésű üvegszálszövet (300g/m²);
- AW Araldite 106 típusú, kétkomponensű epoxigyanta mátrixanyag.
- a gyantát gyorsan keverést követően 15 perc alatt szobahőmérsékleten juttatjuk fel az érintett felületekre;
- az adhéziós kötés kialakítása 6 órán keresztül 3 bar nyomás alatt, 70 °C-on valósult meg, ekkor kedvező az epoxigyanta térhálósodása.

A 7. ábrán látható a P2-es szálerősítésű, 3-as számú próbatest hárompontos hajlítóvizsgálatának eredménye.

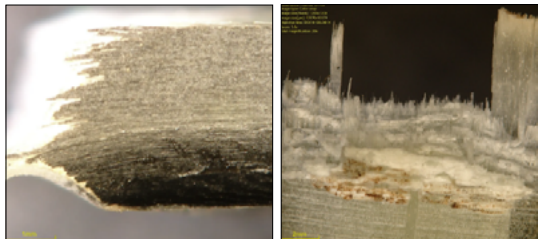
A 9. ábrán látható a P3-as szálerősítésű, 1-es számú próbatest hárompontos hajlítóvizsgálatának eredménye.

3.1. A rétegrendek összehasonlítása

Az 1. táblázat bemutatja, hogy a P1, P2 és P3-as rétegrendű szálerősített kompozit próbatestek esetén hogyan változtak a hárompontos hajlító

1. táblázat. A rétegrendek összehasonlító táblázata a mért maximális hajlítóerők függvényében

Próbatestek sorszámai	P1-es rétegrendű próbatestek dL	P2-es rétegrendű próbatestek dL	P3-as rétegrendű próbatestek dL
1.	7,1 mm	14,6 mm	9,8 mm
2.	7,2 mm	12,8 mm	10,6 mm
3.	6,8 mm	11,5 mm	12,3 mm
4.	6,9 mm	11,8 mm	12,2 mm
5.	6,8 mm	12,3 mm	13,3 mm



10. ábra. A P3-as rétegrendű kompozit próbatestek töreteleinek mikroszkópképe

2. táblázat. A rétegrendek összehasonlító táblázata a mért lehajlások függvényében

Próbatestek sorszámai	P1-es rétegrendű próbatestek F_{max}	P2-es rétegrendű próbatestek F_{max}	P3-as rétegrendű próbatestek F_{max}
1.	5480 N	7785 N	8835 N
2.	5770 N	7215 N	8625 N
3.	5760 N	7345 N	8505 N
4.	5790 N	6885 N	8455 N
5.	5760 N	7090 N	8460 N

tővizsgálatok során mért hajlítóerők maximális értékei, valamint a maximális hajlítóerők elérésekor mért maximális lehajlások értékei.

A P3-as rétegrendű szálerősített kompozit próbatestek mikroszkópképein látható, hogy a **10. ábra** bal oldali, oldalnézeti képén maradó nyúlás figyelhető meg, ehhez képest a korábbi P1-es rétegrendű próbatestek esetén még ridegtörés jelentkezett. A **10. ábra** jobb oldali felülnézeti képén pedig jól láthatóak azok a kereszt szövésű üvegszálszövet-rétegek a hosszirányú üvegszállemezek mellett, amelyek a P3-as rétegrendű szálerősítés alapját képezték.

4. Következtetések

Munkánk során szálerősítést hajtottunk végre az epoxigyanta mátrixanyagú, üvegszál-erősítésű kompozit íjkarokban. Új, csak középen üvegszálszövetes (P2) és több kereszt szövésű üvegszálszövetet tartalmazó (P3) különböző szálerősítést dolgoztunk ki kompozit próbatesteinken a présgépünk segítségével. A nagy gyártók íjkarjaihoz képest (P1) kiemelkedő hajlítószilárdsági eredményeket kaptunk a csak középen üvegszálszövetes próbatesteink anyagvizsgálataikor. Végelem-szimulációs vizsgálatainkat alapul véve nem elégedtünk meg a kapott eredményekkel, így egy más rétegrendű, több kereszt szövésű

üvegszálszövetet tartalmazó kompozit próbatestet fejlesztettünk ki, melynek anyagvizsgálataikor tovább javultak a vizsgálati eredményeink. Míg a gyári íjkaroknál tapasztalt maximális erő hajlítóvizsgálatnál $F_{max} = 5790$ N volt, a csak középen üvegszálszövetes rétegrendűek esetén pedig $F_{max} = 7785$ N, addig a több kereszt szövésű üvegszálszövetes rétegrendűek vizsgálatakor már egy nagyobb, 35%-os teljesítménynövekedés volt megfigyelhető ebben a tekintetben ($F_{max} = 8835$ N), ami azt jelenti, hogy a több kereszt szövésű üvegszálszövetes rétegrendű készült kompozit íjkarok már sokkal alkalmasabban viselik el az üres oldás során kialakuló hajlítófeszültségeket a korábbi rétegrendűekkel szemben. A mikroszkópfelvételek elemzésekor a töreteken pedig megfigyelhető volt, hogy a korábbi, ridegtöréssel sérült gyári íjkarok és a csak középen üvegszálszövetes rétegrendű próbatestekkel összevetve a több kereszt szövésű üvegszálszövetet tartalmazó próbatestek vizsgálata során a töreteken megfigyelhető volt maradó megnyúlás, ami szintén arra enged következtetni, hogy ezen a téren is alkalmasabb az üres oldás jelenség ellen a P3-as rétegrendű kompozit íjkarok alkalmazása.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani az ÉMI-TÜV SÜD KERMI munkatársainak a vizsgálatok elvégzésében nyújtott szakmai támogatásukért és együttműködésükért.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Vathivellu, Sharveenes A/L.: *Analysis of an Archery Bow Using Finite Element Method and the Development of an Archery Bow*. Universiti Malaysia, Pahang, 2013. 30–60.
- [2] Heo W. W., An S. K., Yeum J. H., Yang, S. B., Choi S.: *Manufacture and Vibration-Damping Effect of Composites for Archery Carbon Fiber-Reinforced Polymer Limb with Glass Fiber-Reinforced Polymer Stabilizer*. Materials, 16. (2023) 4048.
- [3] Bott, S.: *Optimal Design of the Limb in Compound Bows*. Columbia. University of Missouri, Missouri, USA, 2019. 18–47.
- [4] Mónus L., Fábíán E. R.: *Combined reinforced composites in sports bows*. 2026 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1348 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1348/1/012017>
- [5] Gere J. M., Goodno B. J.: *Mechanics of Materials*. Cengage Learning. Boston, USA, 2012. 460–525.
- [6] Timoshenko S. P., Gere J. M.: *Theory of Elastic Stability*. New York, USA, 1961. 210–265.
- [7] Peterson R. E.: *Stress Concentration Factors*. New York, 1974. 1–45, 61–120.



Az alakítási martenzit kimutatása 1.4462 számjelű duplex acélban

Detection of Deformation-Induced Martensite in 1.4462 Type Duplex Stainless Steel

Nyáry Vilmos,¹ Korsós Krisztián²

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

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország, krisztian.korsos@edu.bme.hu

Abstract

In our research, we formed test specimens made of 1.4462 type duplex stainless steel sheet to different degrees and then examined whether deformation induced martensite had formed in them. To detect deformation-induced martensite, we performed X-ray diffraction, Feritscope and electron channeling contrast imaging examinations, thus also examining the applicability of the methods. The results of the measurements showed that these methods are not suitable for detecting deformation induced martensite with the tools available to us.

Keywords: *deformation-induced martensite, duplex steel, electron channeling contrast imaging, plastic forming.*

Összefoglalás

Kutatásunkban 1.4462 számjelű duplex acéllemezből készült próbatesteket különböző mértékben alakítottunk, majd azt vizsgáltuk, hogy kialakult-e bennük alakítási martenzit. Az alakítási martenzit kimutatására röntgendiffrakciós, Feritscope-os és csatornahatáson alapuló kontraszt képalkotásos vizsgálatokat végeztünk, vizsgálva ezzel a módszerek alkalmazhatóságát is. A mérések eredményei alapján nem tudjuk biztosan kijelenteni, hogy a vizsgált anyagunkban keletkezett vagy nem keletkezett alakítási martenzit, vagy az általunk alkalmazott módszerek a rendelkezésünkre álló eszközökkel nem alkalmasak az alakítási martenzit kimutatására.

Kulcsszavak: *alakítási martenzit, duplex acél, csatornahatáson alapuló kontraszt képalkotás, képlékenyalakítás.*

1. Bevezetés

Az alakítási martenzit hidegalakítás hatására alakulhat ki, jellemzően ausztenites rozsdamentes acélokban és duplex rozsdamentes acélok azon csoportjában, ahol a kis nikkel tartalom miatt az ausztenit képlékenyalakítás szempontjából metastabil. A duplex acélok olyan rozsdamentes acélok, melyek szövetszerkezetét ferrit és ausztenit alkotja. Nagy szilárdságuk és jó korróziós tulajdonságuk miatt széles körben alkalmazzák őket többek között erőművekben, vegyi üzemekben, hajógyártásban. Az alakítási martenzit a kép-

lékeny alakváltozás hatására az ausztenit fázisból többféleképpen alakulhat ki. Egyik lehetséges útvonal, hogy a felületen középpontosan köbös (fkk) kristályrácsú ausztenit először szorosan pakolt hexagonális rácsú ϵ -martenzitté, majd ha elég nagy az alakváltozás, akkor ez tovább tud alakulni térben középpontos köbös (tkk) rácsú α' -martenzitté. A másik lehetséges útvonal, hogy az ausztenit egyből α' -martenzitté alakul. Az alakítási martenzit kimutatását kifejezetten megnehezíti, hogy az α' -martenzit kristályrácsa és tulajdonságai hasonlóak a ferritéhez. Az alakítási mar-

tenzit ridegebb és keményebb, mint a ferrit és az ausztenit, továbbá korrózióállósága rosszabb ezeknél, ezáltal a képlékenyalakítással gyártott alkatrészekben repedéseket okozhat, illetve növeli az alkatrészekben a korróziós károsodás kockázatát [1]. Jelen kutatásunk arra irányult, hogy a gyárilag hidegen hengerelt 1 mm vastag LDX2205 típusú duplex acélban húzás hatására kialakul-e alakítási martenzit, és hogy az általunk választott vizsgálati módszerek alkalmasak-e ennek a kimutatására.

2. Kísérletek és vizsgálati módszerek

2.1. Kísérlet

A vizsgálatok során 1 mm vastag, 1.4462 számjelű duplex acéllemezről hengerlési irányban kimunkált szakítópróbatesteket húztunk különböző mértékben MTS810 hidraulikus univerzális anyagvizsgáló géppel. A húzás mértékét úgy határoztuk meg, hogy az egyenletes képlékeny alakváltozás szakaszát osztottuk fel egyenlő részekre. Korábban elvégzett szakítóvizsgálataink alapján a kontrakciós szakasz körülbelül 24%-os nyúlásnál kezdődik, így a hat darab próbatestet rendre 4, 8, 12, 15, 18 és 21%-kal nyújtottuk meg.

A megnyújtott próbatestek középső szakaszából mintát vettünk, ezután a húzás irányában és arra merőlegesen egyaránt csiszolatokat készítettünk, majd ezekben röntgendiffraktométerrel (XRD), örvényáramos mágneses vizsgálattal és egy pásztázó elektronmikroszkópos képalkotási technikával, a csatornahatáson alapuló képalkotás (electron channeling contrast imaging – ECCI) módszerével – a vizsgálati módszerek alkalmazhatóságát is vizsgálva – próbáltuk meg az alakítási martenzit kimutatni.

2.2. Röntgendiffrakciós vizsgálat

A röntgendiffrakciós vizsgálatot a Bruker D6 Phaser röntgendiffraktométerrel, θ - 2θ vertikális goniométerrel, 20° és 80° beesési szög között, 30 A áramerősséggel és 40 kV gyorsítófeszültséggel CuK α sugárral végeztük.

2.3. Örvényáramos vizsgálat

Az örvényáramos vizsgálatot a Fischer Feritscope FMP30 típusú műszerrel végeztük, ennek használata egyszerű, ezért könnyen lehet vele ferromágneses fázistartalmat meghatározni, így közvetve kimutatható vele az α' -martenzit, mivel ez szintén ferromágneses. Azt feltételeztük, hogy a szállítási állapotban mért ferrittartalom az alakítás mértékével egyre nőni fog, ami α' -martenzit

jelenlétére utal [2]. Ezzel a módszerrel ε -martenzit nem tudunk kimutatni, mert az nem mágnesezhető, így ez a vizsgálat önmagában nem elegendő az alakítási martenzit kimutatására. Mivel a Feritscope által kibocsátott gerjesztő elektromágneses tér behatolási mélysége 3 mm, a próbatesteket szigetelőanyaggal alátámasztva mértük meg, majd a méréseket úgy is elvégeztük, hogy az elvágott próbatesteket egymásra tettük, hogy nagyobb legyen a vizsgált térfogat, ezáltal növeljük a pontosságot. Ezt a vizsgálatot a próbatestek nem beágyazott részén végeztük, mert a mérőfej átmérője közelítőleg megegyezett a lemez vastagságával, így ha nem éppen a lemez közepére helyeztük, nem adott megbízható eredményt.

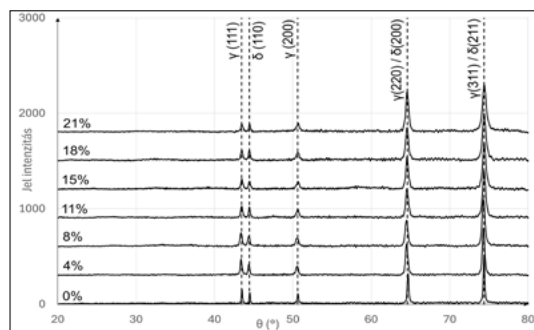
2.4. Csatornahatáson alapuló kontraszt képalkotás (ECCI)

A csatornahatáson alapuló kontrasztot ott alkalmazó képalkotás (electron-channeling contrast imaging – ECCI) egy elektronmikroszkópos anyagvizsgálati módszer. A technika során nagy nyalábáramot és kis gyorsítófeszültséget alkalmazunk, visszaszórt elektron módban. A módszer elve a következő: a nagy nyalábáram nagy elektronfluxust eredményez a felületen, a kis gyorsítófeszültségből fakadó, kis behatolási mélységen. A kontraszt alapját az adja, hogy a csatornahatás miatt az elektronok eltérő mélységben hatolnak be a kristályba a különböző orientációjú tartományokban, és ezek a különböző mélységben keletkezett elektronok eltérő intenzitással tudnak kijutni a felületre [3].

3. Eredmények

3.1. A röntgendiffrakciós vizsgálat eredményei

A röntgendiffrakciós vizsgálat diffraktogramjait az 1. ábra mutatja. Az ábrán nem látható alakítási

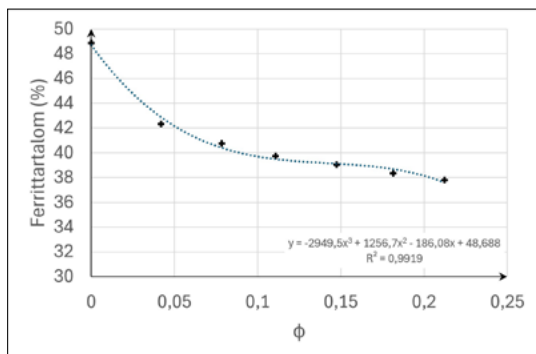


1. ábra. A röntgendiffrakciós vizsgálat diffraktogramjai

martenzitre utaló intenzitáscsúcs, mert a diffraktogramon ez rétegződési hibaként jelenhet meg, így ez a módszer önmagában nem alkalmas a kimutatására, de nem zárható ki az sem, hogy nem alakult ki martenzit. Megfigyelhető még, hogy a képlékeny alakváltozás mértékének növekedésével az intenzitáscsúcsok szélessége is egyre nő, ez a diszlokációsűrűség növekedésével függ össze. Minél nagyobb alakváltozást szenvedett a próbatétel, annál nagyobb lett a diszlokációsűrűség, így annál jobban kiszélesedtek a csúcsok [4].

3.2. Az örvényáramos vizsgálat eredményei

Az egyes mintákon mért ferrittartalmat az alakváltozás függvényében ábrázoltam a **2. ábrán**, melyen látható, hogy az alakítás mértékének növekedésével a ferrittartalom csökken. Ez látszólag ellentmond az eredeti feltételezésnek, miszerint az α' -martenzit kialakulása esetén növekednie kellene a ferromágneses fázis részarányának, amennyiben viszont nem alakul ki, nem kellene változást tapasztalnunk. A ferrittartalom látszólagos csökkenése összefügg a hidegalakítás szövet-szerkezetre gyakorolt hatásaival. Tudjuk, hogy az alakítás hatására a diszlokációsűrűség növekedésével a keménység nő, ez viszont nemcsak szilárdságnövekedést okoz, hanem megváltoztatja az anyag mágneses tulajdonságait is oly módon, hogy a teljes telítési indukcióhoz nagyobb mágneses erőter szükséges, tehát a mágnesezési histerézis görbe kezdeti szakaszához húzott érintőjének meredeksége az alakítás mértékének növekedésével csökken. A látszólagos ferrittartalom-csökkenés azért jelentkezik, mert a Feritscope mérőműszer a mágnesezési görbe kezdeti szakaszán méri a mágneses permeabilitást, ami a görbe ellaposodásával csökkenni fog. Ez alapján megállapítható, hogy a Feritscope nem alkalmas duplex acélokban az alakítási martenzit kimutatására [5].

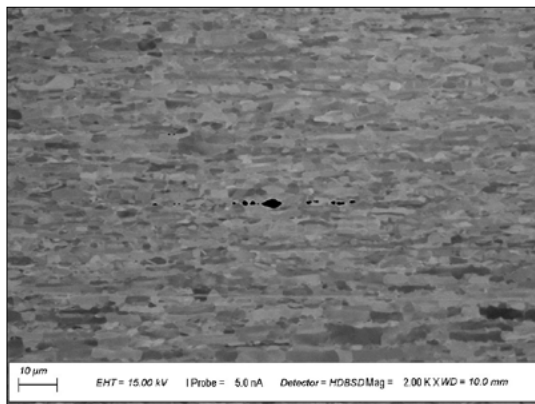


2. ábra. A ferrittartalom változása az alakítás mértékének függvényében

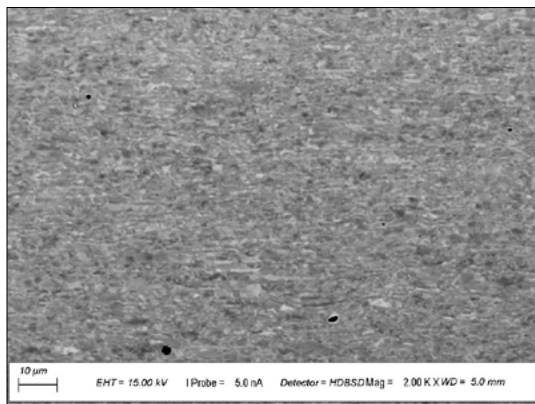
3.3. A csatornahatáson alapuló kontraszt képalkotásos (ECCI) vizsgálat eredményei

Az ECCI vizsgálatot ZEISS EVO MA 10 pásztázó elektronmikroszkóppal végeztük 5 nA nyalábárammal és 15 kV gyorsítófeszültséggel visszaszórt elektron módban. A 4%-os és a 21%-os alakváltozást szenvedett próbatestek húzási iránnyal párhuzamos és arra merőleges metszetéről készült képei láthatók a **3. és 4.**, illetve az **5. és 6. ábrákon**.

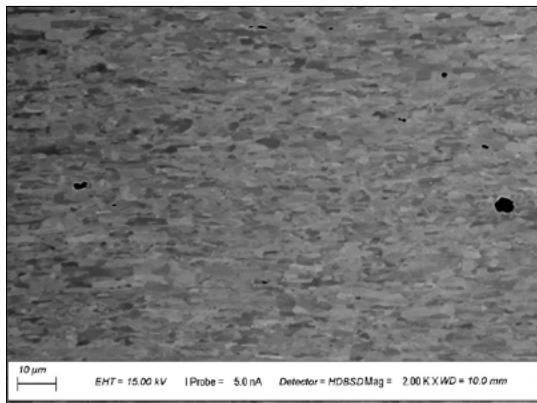
Ezek az ábrák megfigyelhető, hogy a vizsgált lemeznek igen finom a szemcseszerkezete. Emellett megfigyelhető az a nagyon finom szemcsés anyagokra jellemző viselkedés, hogy a kisebb mértékben alakított mintákban még elkülöníthetők a szemcsehatárok, de ezek az alakítás mértékének növelésével egyre inkább elmosódnak. Továbbá az **5. és 6. ábrákon** látható, a hengerlési iránnyal párhuzamos metszeten, hogy a henger-



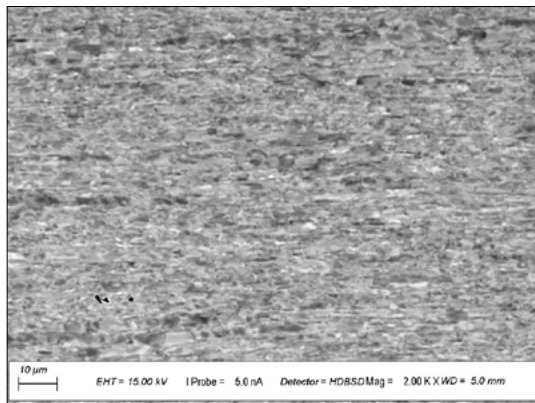
3. ábra. 4%-kal megnyújtott próbatétel ECCI-képe húzási irányra merőleges metszeten



4. ábra. 21%-kal megnyújtott próbatétel ECCI-képe húzási irányra merőleges metszeten



5. ábra. 4%-kal nyújtott próbatest ECCI-képe húzási irányral párhuzamos metszetben



6. ábra. 21%-kal megnyújtott próbatest ECCI-képe a húzási irányral párhuzamos metszetben

léssel már eleve kissé nyújtott szemcseszerkezet még tovább nyúlt. Megfigyelhető még, hogy a legnagyobb alakváltozást szenvedett próbatest szemcseszerkezete finomabbnak tűnik, mint a legkevésbé alakított próbatesté. Ennek lehet az oka ikerképződés vagy éppen martenzites átalakulás, de ezen a nagyításon és ezen a felbontáson nem lehet egyértelműen megállapítani. Ezen a megfigyelésen kívül nem láthatók az ábrákon alakítási martenzit jelenlétére utaló jelek. Ezt részben az okozza, hogy a mikroszkóp felbontóképessége a nyalábáram nagyságával fordítottan arányos, és a vizsgált anyagnak igen finom a szemcseszerkezete, ezért nem sikerült akkora nagyítást elérni, hogy láthatók legyenek a különböző fázisok. Az egyes szemcsék színe csak az orientációjuk miatt különbözik. Ezekből azt kellett megállapítanunk, hogy a rendelkezésre álló eszközökkel és ezek között a vizsgálati körülmények között ez a módszer sem alkalmazható az alakítási martenzit kimutatására.

4. Következtetések

Kutatásunk során az 1.4462 számjelű duplex acéllemezéből készült próbatesteket nyújtottuk meg különböző mértékben abból a célból, hogy alakítási martenzitet hozzunk létre bennük. A megnyújtott próbatesteken vizsgáltuk az alakítás hatására keletkező alakítási martenzit kimutathatóságát és az örvényáramos, illetve a csatornahatáson alapuló kontraszt képalkotás módszerének alkalmazhatóságát az alakítási martenzit kimutatására. A vizsgálatok eredménye alapján a következő következtetéseket vontuk le:

- Képlékenyen alakított duplex acélban keletkező alakítási martenzit kimutatására a Feritscope műszer nem alkalmas.

- A csatornahatáson alapuló kontraszt képalkotási technikával készített képek elemzésével a rendelkezésre álló elektronmikroszkóp adottságai és az alapanyag nagyon finom szemcsés szerkezete miatt az alakítási martenzit kimutatására irányuló törekvéseink szintén nem jártak sikerrel.
- Vizsgálataink eredményeiből nem tudjuk egyértelműen megállapítani, hogy az 1.4462 számjelű duplex acélban keletkezett-e alakítási martenzit, de valószínűleg nem keletkezett.
- Beláttuk, hogy duplex acélban az alakítási martenzit kimutatása rendkívül nehéz és összetett vizsgálatokat igénylő feladat.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Breda M., Brunelli K., Grazzi F., Calliari I.: *Effects of Cold Rolling and Strain-Induced Martensite Formation in a SAF 2205 Duplex Stainless Steel*. Metallurgical and Materials Transactions A, online megjelent: 2014. november 19. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2646-x>
- [2] FERITSCOPE® FMP30 Measurement of the Ferrite Content in Austenitic and Duplex Steel. www.helmut-fischer.com. Helmut Fischer GmbH Institute für Electronic und Messtechnik 71069 Sindelfingen, Germany.
- [3] Electron Channelling Contrast Imaging. <https://www.ebsd.com/ebsd-techniques/channeling-contrast-imaging>
- [4] Jóni B.: *Texturált anyagok vonalprofilanalízise*. Doktori értekezés. Budapest, 2021. <https://scispace.com/pdf/texturalt-anyagok-vonalprofil-analizise-13k845wn.pdf> (letöltve: 2026. március 30.)
- [5] Mészáros I., Bögre B.: *Magnetic Determination of Ferrite Content in Steels*. Acta Physica Polonica A, 136/5. (2019) 681–684. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.136.681>



Járműalkatrész-pótlás additív gyártással

Automotive Spare Parts Production Via Additive Manufacturing

Obsitos Péter,¹ Tóth László,² Kovács Tünde Anna³

¹ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar. Budapest, Magyarország, obsitospeti04@gmail.com

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

³ Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Gépészeti és Technológiai Intézet, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék. Budapest, Magyarország, kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

The study presents the reconstruction and remanufacturing of a missing air filter cover for a German domestic-market motorcycle produced in the 1960s in a series of 80,000 units, using modern engineering methods. The research focuses on the methodology of part replacement in the absence of original documentation or physical samples, based on a reverse engineering approach as well as modern digitalization and additive manufacturing technologies. During this process, the connecting surfaces were captured using a high-precision industrial 3D scanner, which subsequently provided the reference dimensions. The missing dimensions were determined through photographic sources and approximate ratio estimation. Following the creation of the CAD model, the FDM process proved to be optimal among the manufacturing technologies due to its high precision and cost-effectiveness. The material selection was determined by the characteristic properties of the original polymer, leading to the choice of ABS material. Finally, an experimental post-treatment was performed on the prototype produced via additive manufacturing. The results confirmed that this method is suitable for the economical reproduction of components with complex geometries.

Keywords: *reverse engineering, 3D scanning, additive manufacturing, spare parts manufacturing.*

Összefoglalás

A tanulmány egy az 1960-as években 80 000-es példányszámban gyártott német belpiacos motorkerékpár hiányzó légszűrőfedelének korszerű mérnöki módszerekkel történő rekonstrukcióját és újragyártását mutatja be. A kutatás középpontjában a dokumentáció és eredeti minta nélküli alkatrészpótlás módszertana áll, amely fordított mérnöki megközelítésre, valamint modern digitalizációs és additív gyártástechnológiákra épül. Ennek során a csatlakozó felületek nagy pontosságú ipari 3D-szkennerek segítségével kerültek rögzítésre, amelyek később a referenciaméreteket is biztosították. A hiányzó méretek meghatározása fényképes források és közelítő aránybecslés segítségével valósult meg. A CAD-modell elkészítését követően a gyártási technológiák közül a jó pontosság és költséghatékonyság miatt az FDM-eljárás bizonyult optimálisnak. Az anyagválasztást az eredeti polimer jellegzetes tulajdonságai határozták meg, ami alapján ABS-alapanyag kerül kiválasztásra. Az additív gyártással készült próbadarabon végül kísérleti utókezelést hajtottam végre. Az eredmények igazolták, hogy a módszer alkalmas komplex geometriájú alkatrészek gazdaságos reprodukálására.

Kulcsszavak: *visszafejtési mérnöki tervezés, 3D-szkennelés, additív gyártás, pótalkatrészgyártás.*

1. Bevezetés

A járműalkatrészek élettartama és elérhetősége az üzemeltetéssel és az idő múlásával folyamatosan csökken, ami különösen a régebbi, kis példányszámú vagy belpiacos járművek esetében jelent problémát. Ezeknél a típusoknál a gyári pótalkatrészek gyakran nem, vagy csak korlátozott mennyiségben állnak rendelkezésre, míg az utángyártott elemek beszerzése sokszor nehézkes, gazdaságtalan vagy technikailag megoldhatatlan. Ugyanakkor a múltban jellemző túlméretezés és a tervezési biztonsági tartalékok alkalmazása lehetőséget ad arra, hogy a sérült alkatrészeket szakember segítségével, megfelelő javítási módszerekkel még ma is használhatóvá lehessen tenni. Abban az esetben, ha egy komponens hiányzik, vagy a sérülés mértéke túl nagy, az egyetlen megoldás a mérnöki újratervezés és korszerű gyártástechnológiák alkalmazása. Fontos, hogy a rekonstruált alkatrész funkciója az eredetivel megegyező maradjon, miközben a méret- és anyagbeli eltérések minimálisak legyenek [1].

A jelen tanulmány célja egy 1960-as évekbeli Simson Sperber (SR4-3) motorkerékpár hiányzó légszűrőfedelének pótlása [2, 3]. A munka első lépése a pótolandó alkatrész környezetének alapos mérése és 3D-szkenneléssel történő digitális másolat készítése. Ez lehetővé teszi a pontos geometriai adatok rögzítését, amelyek alapjául szolgálnak a további elemzéseknek és a CAD-modell elkészítésének [4]. Ezt követően az eredeti alkatrész anyagához megfelelő nyomtatási alapanyag kiválasztása történik, biztosítva a pótlás szükséges mechanikai és fizikai tulajdonságait.

A tervezés során a rendelkezésre álló információk, korabeli fényképek és dokumentációk segítik a formaterv és a dizájn lehető legpontosabb rekonstruálását. A CAD-modell elkészítése után az alkatrészt rápróbálgják a szkennelt környezetre, ellenőrizve az illeszkedést, a felfekvő felületeket és a mérethelyességet.

A következő lépés a gyártási technológia kiválasztása és a prototípus előállítása, amely során szükség esetén módosítások és újratervezés is történhet a kívánt pontosság eléréséhez. Végül a folyamat része a kész alkatrész utókezelése, mely célja a felületi érdesség csökkentése és a darab külső megjelenésének javítása.

A bemutatott eljárás műszaki és gazdasági szempontból egyaránt előnyös megoldást kínál egyedi vagy nehezen beszerezhető járműalkatrészek pótlására [5].

2. Felhasznált anyagok és módszerek

2.1. 3D-szkennelés

A pótolandó alkatrész összetett geometriája, valamint a nem rögzített belső elemek (pl. légszűrőbetét) jelenléte miatt a precíz újragyártás alapfeltétele a befogadó környezet nagy pontosságú digitális leképezése volt. Az összeszerelt és megfelelően rögzített légszűrőegység virtuális rögzítése Creaform által gyártott és forgalmazott Metra SCAN 750 Elite típusú ipari 3D-szkennerral történt.

A rendszer fő komponensei az 1. ábrán láthatók melyek optikai letapogatást végző kézi szkennerek, a két nagy felbontású, nagy sebességű kameraoptikából álló optikai nyomkövető egység, valamint a feldolgozó szoftverkörnyezet. A szkennelés során a kézi egység hét lézerveresztet és egy kiegészítő lézervonalat vetít a vizsgált felületre; a visszaverődő fénysugarak optikai érzékelése révén a rendszer nagy pontossággal rekonstruálja a tárgy geometriáját. A berendezés kiemelt előnye a biztonságos üzemeltetés és a kalibrációs tanúsítványa szerinti 0,028 mm-es pontosság 9,1 m²-es munkatérben. A szkennerek térbeli helyzetének és orientációjának folyamatos meghatározását a kézi egységen elhelyezett fehér, reflektív célpontok biztosítják; szükség esetén mágneses vagy öntapadó referenciapontok alkalmazhatók a mérési stabilitás növelése érdekében.

A technológia további meghatározó eleme az optikai nyomkövető rendszer, amely két nagy felbontású kamerával és központi infravörös megvilágítással monitorozza a referenciajelöléseket. Ez teszi lehetővé a dinamikus referencia alkalmazását, amely környezeti rezgések mellett is garan-



1. ábra. MetraSCAN 750 Elite szkennerek egység

tálja a rögzített pontok globális koordináta-rendszerben való pontos elhelyezkedését. A mérési folyamatot minden esetben az optikai egység kalibrálása előzi meg, a speciális kalibráló etalon meghatározott pozíciókban történő bemérését követően a szoftver visszaigazolja a kívánt pontosság elérését, amely jelen vizsgálatban 0,032 mm volt. A tényleges adatgyűjtés során a kézi letapogatás eredményei valós időben jelentek meg a számítógépen. A sikeres beolvasást követően a szoftver a nyers pontfelhőből poligonháló-modellt generált. Bár a szoftver kiterjedt utófeldolgozási funkciókkal (pl. geometriafelismerés, felületkorrekció) rendelkezik, de a nagy gyakorlati igénye és korlátozott hozzáférhetősége miatt a további tervezési műveleteket az exportált, köztes formátumú hálómoddellen végeztük el [6, 7].

2.2. Additív gyártás

A légszűrőfedél reprodukálása során elsődleges célként az eredeti geometria és a funkcionális jellemzők megőrzése fogalmazódott meg, a gyors és költséghatékony kivitelezés biztosítása mellett. Az alkatrész összetett, ívelt felületei és kis falvastagsága miatt a hagyományos, illetve CNC-s forgácsolás alkalmazása jelentős technológiai nehézségekkel járt volna, ezért a választás az ún. FDM (Fused Deposition Modeling) 3D-s nyomtatási eljárásra esett, amely olvasztott huzal rétegről rétegre történő adagolásával teszi lehetővé térbeli geometriák előállítását [8]. A gyártás a 2. ábrán látható Bambu Lab P1S típusú nyomtatóval történt, fehér ABS alapanyag felhasználásával. A nyomtatás előkészítése a Bambu Studio szeletelő szoftverben zajlott. Az STL-modell importálását követően 50°-os nyomtatási orientáció került beállításra a

„levegőben nyomtatás” elkerülése, valamint a felületi minőség javítása érdekében. A rétegmagasság 0,08 mm-ben került rögzítésre, míg a nyomtatási sebességet a kritikus ívszakaszokon 50%-kal csökkentettem a megfelelő tapadás és méretpontosság biztosítása céljából. A bonyolult geometria alátámasztására „fa” típusú (tree support) tartószerkezet generálása történt, amely anyagtakarékos és egyszerűen eltávolítható megoldást biztosított. A szeletelési folyamat során előállított G-kód ellenőrzését követően kezdődött meg a tényleges gyártás, amely 270 °C extruder- és 90 °C asztalhőmérséklet mellett, átlagosan 150 mm/s nyomtatási sebességgel valósult meg.

2.3. ABS-alapanyag és utólagos felületkezelés

A 3D-nyomtatás során alkalmazott huzalok közül az ABS (akrilnitril-butadién-sztirol) lett kiválasztva, mivel tulajdonságai az eredeti fröcsöntött alkatrész alapanyagához hasonlóak. Ez az egyik legelterjedtebb hőre lágyuló polimer az FDM-technológiában, és kedvező mechanikai, valamint fizikai jellemzőinek köszönhetően nemcsak prototípusok, hanem funkcionális alkatrészek előállítására is alkalmas. Az ABS viszonylag könnyű, jó ütésállósággal rendelkezik, ellenáll a hőterhelésnek (akár ~100 °C) és a nedvességnek, továbbá elektromosan szigetelő. Enyhe rugalmassága és kiváló utómunkálhatósága lehetővé teszi ipari környezetben, akár tömeggyártásban történő alkalmazását.

Feldolgozása azonban nagyobb odafigyelést igényel, mint például a PLA esetében. Nagyobb olvadáspontja (kb. 220–270 °C) miatt a nyomtatás során fűtött tárgyasztal használata szükséges a megfelelő rétegtapadás és a vetemedés minimalizálása érdekében. Emellett a feldolgozás közben intenzívebb párolgás tapasztalható, ami megfelelő szellőztetés hiányában egészségügyi kockázatot jelenthet [9]. Az FDM-technológiával készült ABS-alkatrészek felületén jellegzetesen láthatóak a rétegről rétegre történő építés nyomai. Mivel a cél sima és esztétikus felület elérése volt, a mechanikai anyagválasztás (csiszolás) helyett kísérleti jelleggel kémiai utókezelést alkalmaztunk. ABS esetén széles körben használt módszer az acetonos gőzölés, amely az anyag oldhatósági tulajdonságain alapul. Fontos kiemelni, hogy ez az eljárás nem alkalmazható minden polimer-nél, egyes anyagoknál visszafordíthatatlan károsodást okozhat. Az acetonos felületkezelés során az alkatrészt zárt, acetongőzzel telített térbe helyeztük úgy, hogy a folyékony aceton közvetlenül



2. ábra. Bambu Lab P1S nyomtató

ne érintkezzen a felülettel. Az acetongőz a külső réteg részleges oldódását idézi elő, ami a felszín megduzzadását és a rétegvonalak elmosódását eredményezi. A szárítás során az oldószer elpárolog, és a felület újra megszilárdulva simább, fényesebb megjelenést biztosít. A megfelelő expozíciós idő meghatározása kritikus, mivel a túlzott gőzölés a falvastagság mélyebb rétegeibe is behatolhat, ami deformációhoz vagy a tartósság csökkenéséhez vezethet. Kereskedelmi ABS-huzalok esetén az optimális kezelési idő eltérő lehet, ezért a beállítások rendszerint tapasztalati úton kerülnek meghatározásra [10, 11, 12].

3. Mérések és vizsgálatok

3.1. Helyettesítő alkatrész méreteinek meghatározása

A hiányzó légszűrőfedél pontos rekonstruálása komoly kihívást jelentett, mivel a 3D-szkennelés során nyert modell csupán a csatlakozó peremetek és a légszűrőház felfekvő felületeit rögzítette. Az eredeti formaterv és a rögzítési pontok precíz rekonstruálásához nem állt rendelkezésre elegendő fizikai információ, ezért internetes forráskutatóra volt szükség. A fellelt alig egytucatnyi fotók többsége az összeszerelt állapotot ábrázolta, és csak kettő mutatta közvetlenül a keresett fedelet.

A méretezett rajzok hiányában elsőként digitális rekonstrukciós eljárást, fotogrammetriát alkalmaztunk a modell előállítására. Erre a célra a nyílt forráskódú Meshroom szoftvert használtuk, amely jellegzetes pontokat azonosít, éleket és mintákat ismer fel, majd ezeket az egymást átfedő képek között párosítja. A program kiszámítja a kamerák pozícióját és orientációját minden felvételhez, majd a pontfelhőből háromszögelés segítségével poligonhálós modellt generál, hasonlóan a 3D-szkenneléshez. Bár a módszer elméletileg pontos közelítést adna az arányokra, a szoftver futtatásához szükséges minimum 30–50, különböző szögből készült, egységes minőségű felvétel nem állt rendelkezésre [13, 14]. A kísérlet során a program csupán két fotót tudott felhasználni, így az eredmény értelmezhetetlen, véletlenszerű pontfelhő lett.

A sikertelen fotogrammetriás eljárás után alternatív megoldásként képalapú aránybecslést alkalmaztunk, vagyis a fotókon látható geometriai elemeket a 3D-szkennelésből nyert referenciameretekhez viszonyítottuk, és több nézet átlagolásával határoztuk meg a közelítő távolságokat és arányokat. Ez a módszer, bár pontosságban elmarad a szoftveres rekonstrukciótól, elegendő

dő kompromisszumot nyújtott a funkcionálisan és esztétikailag megfelelő modell létrehozásához. Ezek alapján a tényleges 3D modell Solid Edge szoftverben készült el, befoglalt méretei $114 \times 94 \times 35,4$ mm-re adódtak.

3.2. Nyomatott darab méretpontossága és felülete

A gyártás előtti méretellenőrzés a kész modell és a korábban besz kennelt légszűrőegység virtuális összeszerelésével történt. Ez a digitális összeépítés lehetővé tette az illeszkedési hibák korai azonosítását és a modell finomhangolását a nyomtatás előtt. A nyomatott alkatrész méretpontossága kiváló volt; a CAD-modellhez képest az eltérések mindössze 0,05–0,1 mm között mozogtak. A fedél megfelelően illeszkedett a légszűrőházhoz és a légszűrőbetétéhez.

Az FDM-eljárással készült légszűrőfedél nyomtatási minősége általánosságban kiváló volt, azonban az alátámasztások eltávolítása után visszamaradt felületi egyenetlenségek további megmunkálást igényeltek. A durvább hibákat első lépésben P200-as csiszolóvászonnal végzett mechanikai csiszolással korrigáltuk, törekedve a környező felületek felületminőségének egységesítésére.

3.3. Utókezelés hatása a darabra

Mivel a túlzott expozíciós idő szerkezeti deformációhoz vagy a falvastagság átlágyulásához vezethet, a technológiát először próbadarabon teszteltük. A kísérlet során az alkatrészt a források által javasolt maximális időtartamig, egy órán keresztül kezeltük acetongőzben szobahőmérsékleten (20 °C), 5–10 perces kontrollintervallumokkal, majd 24 órás pihentetés és szellőztetés követte. Az eredmény egy fényesebb, esztétikailag csak kismértékben javult felület lett.

A mérések során azonban megállapítottuk, hogy a kémiai felületkezelés átlagosan 0,5 mm lineáris zsugorodást okozott a nyomatott méretekhez képest. Ezen tapasztalatok figyelembevételével végeztük el a végleges alkatrész finomhangolását. Mivel a felületjavulás elmaradt a várt mértéktől, egy másik próbadarabon ismét elvégeztük az acetonos utókezelést, azonban az expozíciós időt 2 órára növeltük. Ennek következtében a darab intenzívebben átvódott acetongőzzel, ami lágyabbá és deformálhatóbbá tette. A szárítást követően egyértelműen megfigyelhető volt a felület jelentős javulása, ugyanakkor nagyobb, átlagosan 3 mm-es zsugorodást és a darab egyes pontjain kisebb deformációt tapasztaltunk. Ezen eredmé-

nyek alapján az alkatrész végleges nyomtatási finomhangolását az 1 órás felületkezeléshez igazítottuk.

4. Következtetések

A tanulmány eredményei igazolják, hogy a visszafejtéses mérnöki tervezés (reverse engineering) és az additív gyártástechnológia együttes alkalmazása hatékony és gazdaságos megoldást nyújt a hiányzó dokumentációval vagy mintadarral nem rendelkező járműalkatrészek pótlására. A nagy pontosságú ipari 3D-szkennelés során elért 0,032 mm-es kalibrációs érték biztosította a precíz illeszkedéshez szükséges referenciaméreteket, amelyek kritikus fontosságúak voltak a komplex belső elemek és a csatlakozó peremek rögzítésekor. Megállapítható, hogy a fotogrammetria eljárás korlátozott számú forráskép esetén nem szolgáltat értékelhető adatot, azonban a képalapú aránybecslés a 3D-szkennelt környezettel kombinálva elegendő pontosságot nyújt az esztétikailag és funkcionálisan megfelelő CAD-modell elkészítéséhez. A gyártás során alkalmazott FDM-eljárás és az ABS alapanyag választása optimálisnak bizonyult, mivel az ABS fő fizikai és mechanikai tulajdonságaiban nagyfokú hasonlóságot mutat az eredeti, fröccsöntött polimer alkatrész jellemzőivel. A nyomtatott prototípus méretpontossága 0,05–0,1 mm-es tűréshatáron belül maradt a virtuális modellhez képest, igazolva a technológia alkalmasságát. A kémiai utókezeléssel kapcsolatos vizsgálatok rávilágítottak arra, hogy az acetonos gőzölés javítja a felületi érdességet, ugyanakkor az expozíciós idő növelésével fokozódó lineáris zsugorodást és szerkezeti deformációt okoz. A folyamat optimalizálása érdekében az alkalmazott ABS-alapanyag speciális jellemzőitől függően javasolt lehet a hevített, megközelítőleg 40 °C-os acetongőzös környezet alkalmazása. Ez a technológiai módosítás jelentősen növelheti a felületkezelés hatékonyságát és minőségét, miközben az expozíciós idő radikális csökkentése révén minimalizálható a darab méretbeli torzulása és a kedvezőtlen anyagszerkezeti változások kockázata. Összességében a bemutatott komplex módszertan megbízható alapot nyújt az egyedi járműalkatrészek reprodukálásához.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Kumar S., Kumar N., Chattopadhyay S.: *Reverse Engineering and Case Studies*. In: Polymer Characterization (szerk.: Chattopadhyay S., Kumar N.). Springer, Singapore, 2026. 297–304.
https://doi.org/10.1007/978-981-95-2609-3_12

[2] Polo Motorrad, Simson Sperber SR 4-3 (1966-1972). 2024.
<https://magazin.polo-motorrad.com/polo-bike-datenbank/simson-sperber-sr-4-3-1966-1972/> (letöltve: 2026. január. 13.)

[3] DDR-Motorrad.de, Luftfilter & Ansauganlage Simson Sperber SR4-3. 2026.
<https://ddr-motorrad.de/Ersatzteile-Simson-DDR-Mopeds/Simson-Sperber/Luftfilter> (letöltve: 2026. január 13.)

[4] Haleem A., Javaid M., Singh R. P., Rab S., Suman R., Kumar L., Khan I. H.: *Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview*. International Journal of Cognitive Computing in Engineering, 3. (2022) 161–171.
<https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2022.08.003>

[5] Gávay Gy. V.: *Logisztikai járművek alkatrészpótlása 3D nyomtatási technológia alkalmazásával*. Katonai Logisztika, 31/3–4. (2023) 208–226.
<https://doi.org/10.30583/2023-3-4-208>

[6] 3D Solutions, Logiciels d'inspection 3D - Geomagic Control X & GOM Inspect. 2026.
<https://www.3dsolutions.fr/produits/logiciels3d/inspection/> (letöltve: 2026. január 13.)

[7] Nebraska Innovation Studio, SOP Creaform 3D Scanner, HandySCAN Black and VXElements 11.
<https://innovationstudio.unl.edu/sites/unl.edu/research.nebraska-innovation-campus.innovation-studio/files/media/file/SOP%20Creaform%203D%20Scanner.pdf> (letöltve: 2026. január 13.)

[8] Gajdács L., Szűcs V. D.: *A 3D-nyomtatás gyártástechnológiai, felhasználási területei, illetve az ebben rejlő potenciál*. Repüléstudományi Közlemények, 32/1. (2021) 101–110.
<https://doi.org/10.32560/rk.2020.1.7>

[9] Ahn S., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P. K.: *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*. Rapid Prototyping Journal, 8/4. (2002) 248–257.
<https://doi.org/10.1108/13552540210441166>

[10] Pestano V., Pohlmann M., Silva F.: *Effect of Acetone Vapor Smoothing Process on Surface Finish and Geometric Accuracy of Fused Deposition Modeling ABS Parts*. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 10. (2022) 1–9.
<https://doi.org/10.4236/msce.2022.1010001>

[11] Kesvarakul R.: *Mixture and Process Optimization of Vapor Smoothing Using Acetone and Ethanol for 3D Printed ABS*. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. (2026)
<https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2026.02.004>

[12] Chohan J. S., Singh R., Boparai K. S.: *Vapor smoothing process for surface finishing of FDM replicas*. Materials Today: Proceedings, 26. 10th International Conference of Materials Processing and Characterization. (2020) 173–179.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.013>

- [13] Enesi I., Kuqi A.: *Performance Analysis for 3D Reconstruction Objects in Meshroom and Agisoft–A Comparative Study*. International Journal of Online and Biomedical Engineering, 19/05. (2023) 22–41.
<https://doi.org/10.3991/ijoe.v19i05.37257>
- [14] Remondino F., El-Hakim S.: *Image-based 3D Modelling: A Review*. The Photogrammetric Record, 21. (2006) 269–291.
<https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>



A szürke nyár törésképeének vizsgálata tartószerkezeti felhasználás céljából

Fracture Analysis of Grey Poplar for Structural Applications

Szőke Fanni,¹ Kánnár Antal²

¹ Soproni Egyetem, Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar, Kreatívipari Intézet. Sopron, Magyarország, Szoke.Fanni@phd.uni-sopron.hu

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

Abstract

To expand the application possibilities of grey poplar (*Populus × canescens*), it is important to know its strength values and behaviour. As an anisotropic material, the structural use of wood is significantly influenced by its failure modes. The analysis of fracture patterns resulting from tensile and compressive strength tests on test specimens prepared in the main anatomical directions is important for predictable design. Further classification within the group is the separation of sapwood and heartwood samples, which shows two groups regarding elastic and brittle characteristics.

Keywords: *grey poplar, strength, surface, anisotropy, fracture analysis.*

Összefoglalás

A szürke nyár (*Populus × canescens*) alkalmazási lehetőségeinek bővítése érdekében fontos szilárdsági értékeinek és viselkedés módjának ismerete. A faanyag mint anizotrop anyag szerkezetépítési felhasználását jelentősen befolyásolják annak tönkremeneteli esetei. A fő anatómiai irányokban kialakított próbatestek húzó- és nyomószilárdsági vizsgálataiból adódó mérések során bekövetkezett törésképek a szakirodalomban részletezett típusokkal összhangban vannak, ugyanakkor csoportosíthatóvá válnak irányok szerint. További, a csoporton belüli osztályozást jelent a szíjács- és gesztminták különválasztása, ami a rugalmas és a rideg jellemzőket illetően két csoportot mutat.

Kulcsszavak: *szürke nyár, szilárdság, felület, anizotrópia, töretfelület.*

1. Bevezetés

Napjaink egyik legfőbb problémája a klímaváltozás, mely jelentős hatással van az érzékenyebb fajok életfeltételeire. A csapadékmennyiség csökkenése, a hőmérséklet emelkedése miatt a növények vízszükséglete növekedni kezd. Mivel nem jut elég mennyiséghez, ez kiszáradáshoz, illetve rovarok elleni csökkent ellenálló képességhez vezethet [1, 2].

A szürke nyár (*Populus × canescens*) egy Magyarországon őshonos, jelentős állományú faj, mely jó alternatívaként szolgálhat a klímaváltozás hatására csökkenő számú fajok helyettesítéséért.

A szürke nyár egy jól termesztendő, gyorsan növekvő faj, mely a mai magyar fagazdaságban 1,5 millió hektár erdőterületet foglal el. Ebből évente 1,3–1,5 millió m³ faanyag kerül a kereskedelembe. Ez a mennyiség az összes évi fatermelés 23–25%-a. Felhasználását elsősorban ládák, raklapok, alátétek, forgácslapok, farostlemezek gyártása jellemzi [3]. Szerkezeti felhasználása elvben lehetséges, ugyanakkor a gyakorlati alkalmazás kiszámíthatóságot, tervezhetőséget igényel, emiatt fontos a különböző anatómiai irányokban, mechanikai behatásokra reagáló törési tulajdonságok ismerete.

2. Anyagok és módszerek

A szürke nyár törésképe jelentősen függ a rostlefutási iránytól, valamint attól, hogy a szíjács- vagy gesztrész domináns a próbatestben. A szíjács, mely a tápanyag és nedvesség szállításáért felel, 30–40% arányban van jelen, nedvességtartalma nagyobb, mint a gesztrészeké. Utóbbi az elhalt részeket tartalmazza, mely csersavat és lignint rak tároz el, így keményebb és szárazabb szerkezetet eredményez. A szakirodalom szerint ezen részek különböző viselkedése függ a fajtától. Egyes vizsgálatok tölgy esetén kimutatták, hogy a szíjács és geszt mechanikai tulajdonságai nem különböztek egymástól számottevően, valamint a geszt nem mutatott nagyobb szilárdságot a szíjácsrészeknél [4]. E vizsgált faj esetében a szerkezeti tervezhetőséget nem befolyásolta a farészek közötti különbség, míg kifejezetten gyorsan növekedő fajok vizsgálatánál a legtöbb paraméter között szignifikáns eltérés mutatkozott, néhány tényező kivételével [5]. A fajspecifikus vizsgálatok érdekében a minták kialakításánál elkülönítésre kerültek a szíjács és geszt farészek, hogy az egyes részekre vett szilárdságok megkülönböztethetők, valamint a töréstípusok kimutathatóak legyenek, amennyiben eltérnek egymástól.

A szilárdsági vizsgálatok során a három fő anatómiai irányban vizsgáltuk az anyag viselkedését. Ennek során longitudinális (L), radiális (R), tangenciális (T) irányokat és ezek síkjait különböztettük meg, ahol irányfüggően kialakításra kerültek a 0°, 45° és 90°-os próbatestek. Az Askenazi-féle anizotrop szilárdságelmélet és gyakorlati tapasztalat lehetővé teszi 45°-os rostlefutás esetén a nyírószilárdság kísérleti meghatározását. Ennek során a nyírási keresztmetszet mentén egyenletes a nyírófeszültség eloszlása [6].

A vizsgálatok során irányonként – LR0°, LR45°, LR90°, LT45°, LT90°, RT45° – 30 szíjács és 30 geszt, összesen mintegy 400 próbatesten történt nyomószilárdsági, valamint ugyanennyi darabszámú próbatesteken húzószilárdsági mérés. A vizsgálatokhoz Instron 5985 univerzális anyagvizsgáló gép állt rendelkezésre. A nyomószilárdsági mérés az ISO 13061-17 szabvány alapján zajlott, 1 és 5 perc közötti időre kalibrálva, a próbatest törésének bekövetkezéséig [7]. A húzószilárdság vizsgálata az ISO 13061-06 szabvány alapján ment végbe, szintén a próbatestek törésének bekövetkezéséig [8]. A nedvességtartalmat klimatizáló helyiségben (hőmérséklet 20 °C, páratartalom 65%) való tárolással optimalizáltuk a különböző kialakítású próbatestekre, ezzel kizárva az emiatt

bekövetkező törésképi különbségeket, mely légszáraz (12%-os) állapotot eredményezett.

A törésképek a szakirodalom alapján szintén nagyban függenek az anatómiai irányoktól, valamint a szíjács- és gesztrészek tekintetében is lehet eltérés. Tölgyek esetében korábbi vizsgálatok alapján a mechanikai tulajdonságok nem tértek el egymástól jelentősen [9], míg gyorsan növekedő fajoknál kimutatták, hogy némelyik mechanikai tulajdonság értékeinél számottevőbb különbség jelentkezik [5].

A szakirodalom szerint nyomás esetén longitudinális, rostokkal párhuzamos irányban több különböző alaptípust lehet megkülönböztetni, mint például összeroppanás, ék alakú hasadás, nyíródás, hasadás, összeroppanás és hasadás, valamint a végek elcsúszása, kinyílása. Tangenciális és radiális irányban a rostra merőleges nyomás jellemző törésképei a korai pászta egy területének összeroppanása (elnyíródás egy évgűrű mentén), valamint az évgűrűk kihajlása [10, 11].

Rosttal párhuzamos húzás esetén szakadásos törés, kombinált húzási és nyírási törés, elnyíródás, rideg törés jellemző, rostra merőleges húzás esetén pedig a korai pászta mentén való törés, évgűrű mentén való elnyíródás, valamint bélsugár mentén való törést különböztet meg a szakirodalom [10, 11].

A törésképekről fotódokumentáció készült Hitachi S-3400N pásztázó elektronmikroszkóp, illetve Nikon SMZ800 sztereoszkóp segítségével.

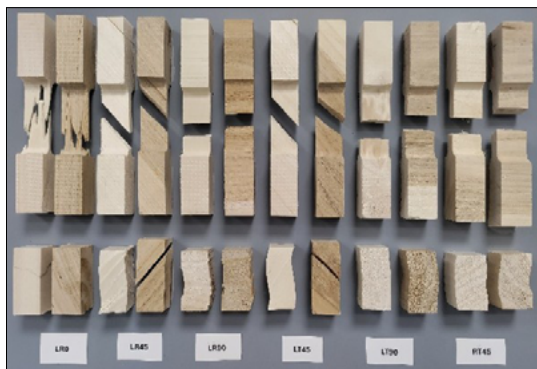
3. Eredmények és kiértékelésük

A vizsgálat során készített fotódokumentációból a legjellegzetesebb, legtöbbször előforduló törésképeket elemeztük. A próbatestek az alább látható módokon roncsolódtak a húzó- és nyomószilárdsági vizsgálatok során (1. ábra).

Az elektronmikroszkópos próbatestek előállításához, a vizsgálatokat követően levágtuk a törési felületeket a méretcsökkentés érdekében, mely a 2. ábrán látható. Mindegyik minta azonosító jelet kapott a beazonosíthatóság érdekében.

A továbbiakban irányonként szerepelnek az elektronmikroszkópos felvételek. Az LR0°, tehát rosttal párhuzamos nyomás során kialakult törésképeit a következő ábra mutatja a szíjács- és gesztrészeket illetően (3. ábra). Jól látható a szíjácsra jellemző összeroppanás, ék alakú hasadás, geszt esetén pedig hasadás, nyíródás jellemzi, szöveti szétválásokkal.

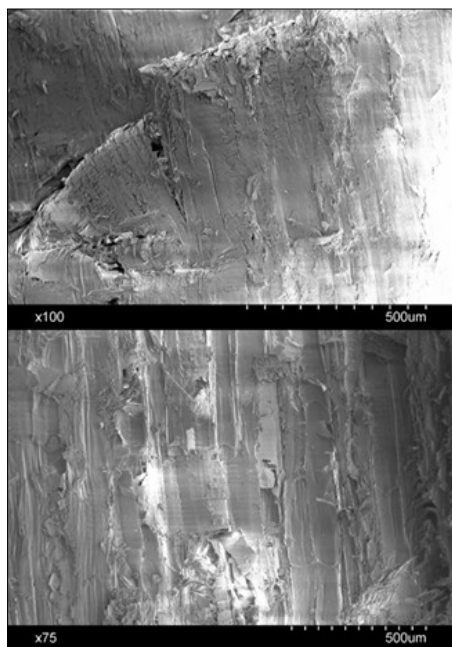
A húzószilárdsági törésképekre szakadásos törés, másodlagos sejtfal-kihámozódás és kombinált húzási és nyírási törés jellemző mindkét eset-



1. ábra. A próbatestek törés után



2. ábra. A próbatestekről levágott próbatestek, amelyek a törésfelületek vizsgálatára szolgálnak



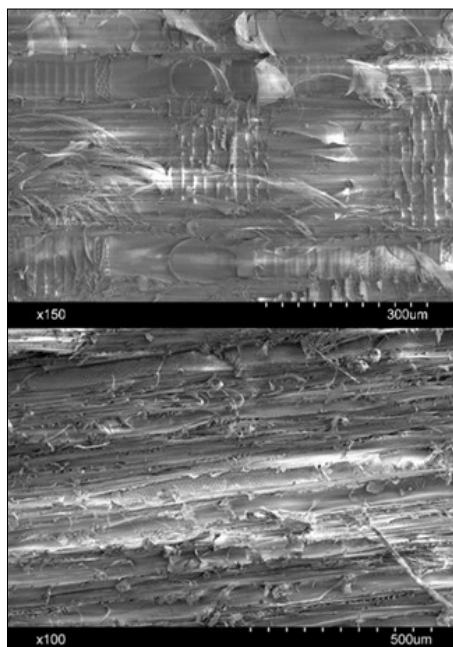
3. ábra. LR0° irányú nyomás során létrejött törésképek – szíjács és geszt

ben. A szíjács lokális anyagkiszakadásokat mutat, míg a geszt képen kihámozódások és rideg nyírási törések, részleges réteges szétválások mérvadóak (4. ábra).

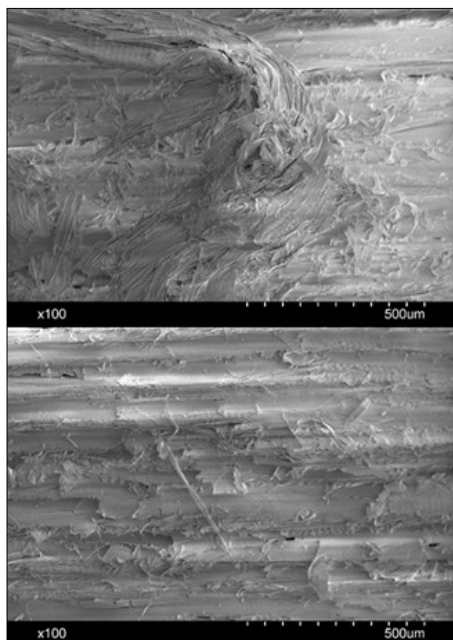
LR45° irányban nyomásra a szíjácsminták jelentős alakváltozást szenvedtek, évgűrű mentén való összeroppanással, ugyanakkor egyben maradtak, ezt a rostkötegek gyűrődése, csomósodás jellemzi. A geszt részen nyíródás ment végbe, maradandó alakváltozás nélkül, a sejtfalak rétegesen leválnak a rostokról, ridegen viselkedve (5. ábra).

A 45°-os irányú húzószilárdság mintái nyírási törést szenvedtek. A szíjácsrészekben a rostok kiszakadása ment végbe, a másodlagos sejtfal S2 rétegei – melyek a sejtfal szilárdításában, fibrillalefutasuknak és vastagsági arányuknak köszönhetően döntő szerepet játszanak – kihámozódtak. A gesztben a nagy sejtüregeknél és egyéb farészek sejt falon átmenő rideg törési felületet mutatnak, ez az elektronmikroszkópos képeken is jól kivehető (6. ábra).

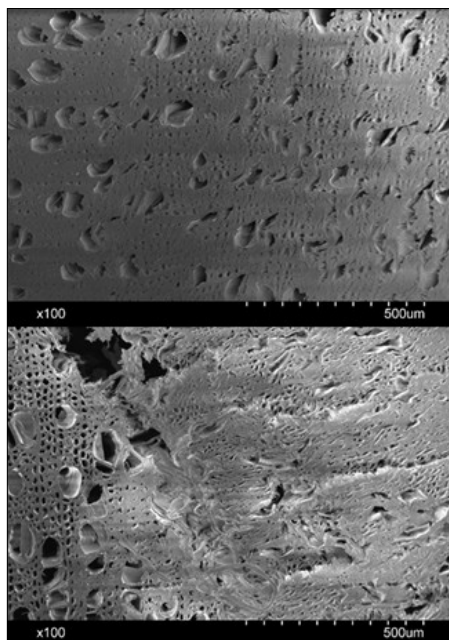
Az LR90° nyomás törésképek (7. ábra) jellemzően a szíjács esetén összeroppanást és elnyíródást mutattak az évgűrűk mentén. A próbatestek egyben maradtak, jelentős maradandó alakváltozással. A geszt minden esetben ridegen viselkedett. A törésképeket a sejt sorok összeroppanása jellemezte, amely a próbatest szétválását eredményezte. Jól megfigyelhető a nagy átmérőjű



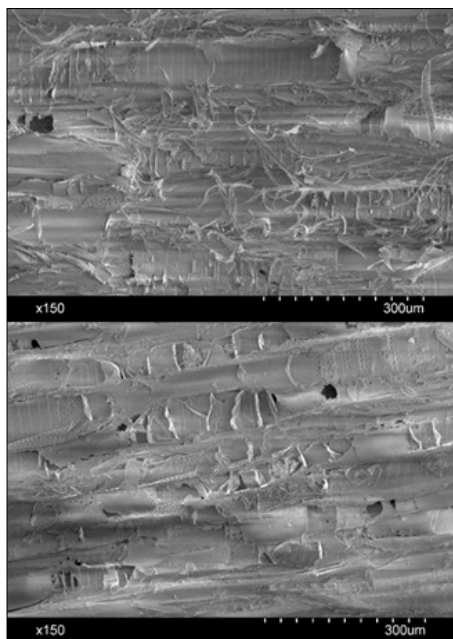
4. ábra. LR0° irányú húzás során létrejött törésképek – szíjács és geszt



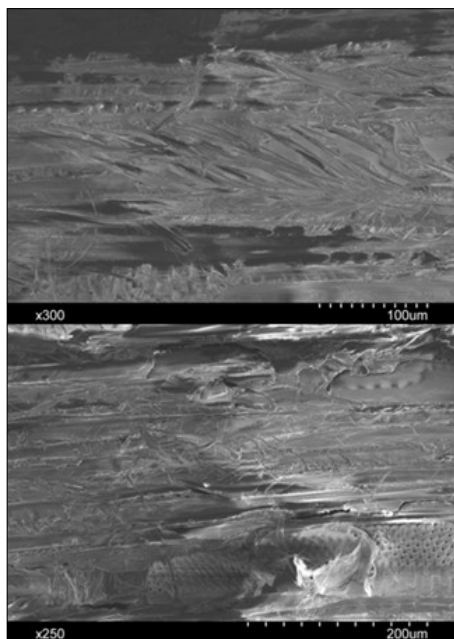
5. ábra. LR45° irányú nyomás során létrejött töréskép – szíjács és geszt



7. ábra. LR90° irányú nyomás során létrejött töréskép – szíjács és geszt



6. ábra. LR45° irányú húzás során létrejött töréskép – szíjács és geszt



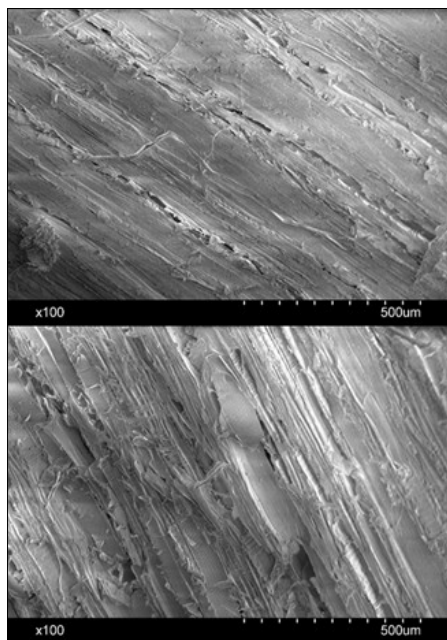
8. ábra. LR90° irányú húzás során létrejött töréskép – szíjács és geszt

edények deformációja, mely szíjácsnál jelentősen ellaposodott, gesztnél teljesen összepréselődött, a sejtfaalak megroppantak.

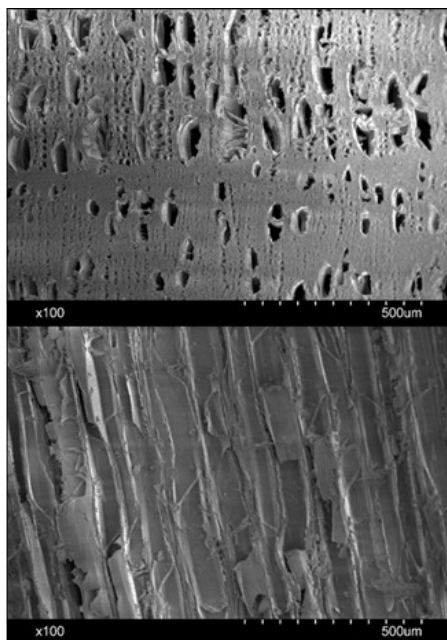
Az LR90° irányú húzópróbatetek törésképe a korai pászta mentén való törés, valamint évgyü-

rű mentén nyíródás jellemző. Az elektronmikroszkópos felvételek alapján nem volt jelentős különbség, a geszt kismértékben durvább törede-zést mutat (8. ábra).

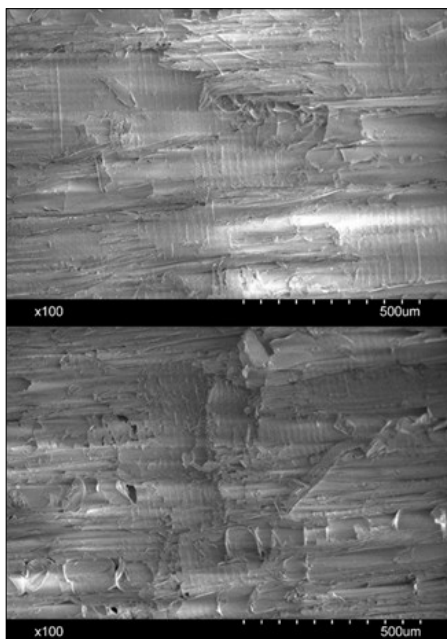
LT45°, tehát rostra 45°-os szöget bezáró irányú



9. ábra. LT45° irányú nyomás során létrejött töréskép – szíjács és geszt



11. ábra. LT90° irányú nyomás során létrejött töréskép – szíjács és geszt



10. ábra. LT45° irányú húzás során létrejött töréskép – szíjács és geszt

nyomószilárdsági vizsgálat szíjácsmintái nyíródásra, „S” alakú tartós alakváltozással, a húzott oldalak szétnyílásával mentek tönkre, míg a geszt alakváltozás nélkül, ridegen hasadt el. A felvételeken a szíjács szöveti egységei hosszirányú

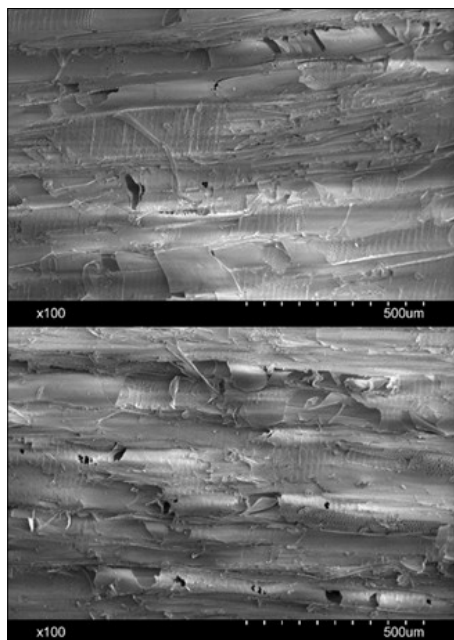
repedések mentén váltak el, miközben a felület alapvetően sima, mely a nyíró igénybevétel törési felületét mutatja. A geszten ezzel szemben néhol lépcsőzetes törések fordultak elő (9. ábra).

Ugyanezen irányban húzásra a próbatestek törésképe rideg jellegű, karakteres nyírási vonallal. A szíjács hosszirányú kiszakadásokat mutat, amelyben a rostok külön való kiszakadása nem jellemző. A geszt felvételei lépcsőzetes töréseket ábrázolnak (10. ábra).

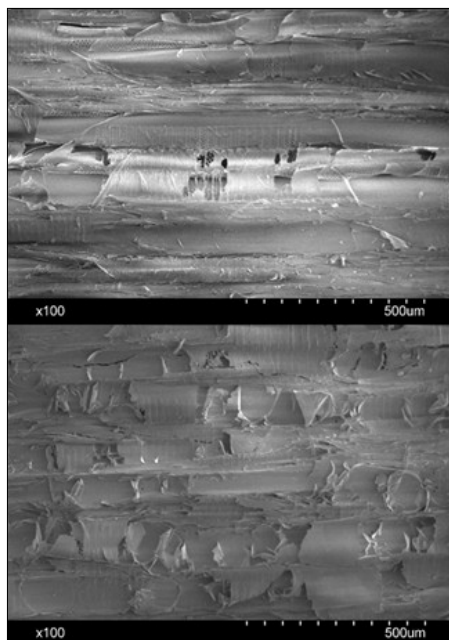
Az LT90° próbatestek rostra merőleges nyomási tönkremenetel képeit az évgűrűk kihajlása, alakváltozás jellemezte, mely a gesztnél maradandóbban ment végbe a szíjácshoz képest. Utóbbinál az edények környezetében kisebb deformációk, szakadások mutatkoznak, azok összenyomódásával, míg a geszt rostok mentén való delaminációt, hosszirányban való hasadásokat mutat (11. ábra).

A tangenciális húzószilárdsági próbatestek a bélsugár mentén törtek el. A szíjácsrészekben a sejtfalrétegek leváltak, ily módon megszakítva a rostok közötti kapcsolatot. A gesztképen helyenként repedések dominálnak, jelentősebb mennyiségű törmelékkel (12. ábra).

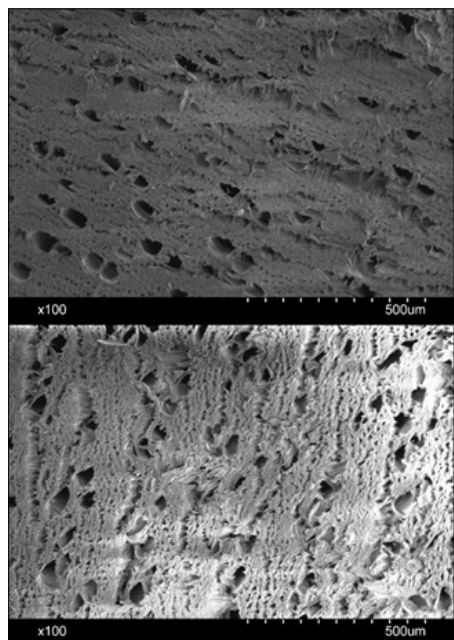
A töréseket RT45°, azaz rostra 45°-os irányú nyomásra az évgűrűk kihajlása jellemezte, amely a szíjács esetén szinte mindegyiknél szemmel látható törést szenvedett, gesztnél maradandó alakváltozást mutatott. A mikroszkópos fel-



12. ábra. LT90° irányú húzás során létrejött töréskép – szíjács és geszt



14. ábra. RT45° irányú húzás során létrejött töréskép – szíjács és geszt



13. ábra. RT45° irányú nyomás során létrejött töréskép – szíjács és geszt

vételeken a szíjács sejtes szerkezete több helyen teljesen ellapult, az edények deformálódtak, valamint az azt övező alapszövet is összetömörödött. A gesztnél a roncsolódás mértéke fokozottabb, a

sejtfalak összeroppantak, nagyobb mértékű tönkremenetelt képezve (13. ábra).

A 45°-os húzás törésképei esetén rideg nyírási törés keletkezett. A szíjácsnál a rostok hosszirányában nagy felületen váltak le, melynek a hártvaszerű rétegek is köszönhetőek. A gesztrészen szintén rideg nyírási törés látható, melynek során a rostok rétegei inkább elcsúsztak egymáson (14. ábra).

4. Következtetések

A nyomó- és húzószilárdsági mérési eredmények jól demonstrálják a faanyag anizotrop tulajdonságait. Minden sítot és irányt lefedve átfogó kép kapható az egyes típusú törésekről, melyben jelen volt nyírási, deformáció, rostkiszakadás, hasadás és további tönkremeneteli lehetőségek. Az e vizsgálat során megjelenő törésképek jellege kimutatható a vizsgálatok során kirajzolt feszültség-alakváltozás diagramokból – melyeket további publikációkban ismertettünk [12, 13] –, a próbatest viselkedésére, tönkremenetel típusára utalva.

A szíjács- és a gesztrészek között a mérések során jelentős különbség volt megfigyelhető. A szíjács helyenként rugalmas-szívós viselkedést mutatott, a rostok csúsztak, alakváltozást szenvedtek, de a próbatest egyben maradt nyomás hatására. Húzásra szintén rugalmasabban, szí-

vósabban viselkedett, a szálkásabb törésképek is emiatt keletkeztek. A geszt nyomási tönkremenetelkor sokkal ridegebb törésképek jöttek létre, többnyire a minták szétválásával, rostok szakadásával, törésével. A húzó igénybevételnél szintén rideg jellemzők domináltak, a szíjácshoz képest korábban bekövetkezett a törés. Az eredményeket szakirodalommal összevetve megállapítható, hogy míg azon leírások megfelelnek a mérési eredményeknél tapasztalható törésképek formáival, ott nincs részletezve külön a szíjács és geszt farészek egyedi viselkedése.

Néhány próbatest nyomó- és húzószilárdsági vizsgálatánál vegyes, mindkét részt tartalmazó próbatestek is előállításra kerültek. Ekkor a tönkremenetel általában a két rész határán ment végbe, mely szintén alátámaszthatja az állítást, miszerint van különbség a két faanyagréz között, mivel az eltérő tulajdonságok belső feszültségek felhalmozódásához vezethetnek a határterületben.

A szilárdsági mérések során meghatározott adatok alapján a szíjács kisebb szilárdsági értékei ellenére megbízhatóbb és rugalmasabb viselkedést mutatott, kis szórással. Ezzel szemben a geszt nagyobb szilárdsági eredménye ellenére ridegebb viselkedésével, nagyobb szórással, a szerkezeti méretezés tekintetében kiszámíthatatlanabb módon viselkedett.

Az eredmények alapján elmondható, hogy a szürke nyár szíjács- és gesztreszei különböző módon viselkednek erő hatására. Gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából, mint szerkezeti megoldásokban kívánt felhasználandó faanyag, figyelembe veendő bármely kialakítási eshetőség, mivel az előállítás és a gyártás során nem várható el a farészek különválasztása. A szilárdsági osztályba sorolás tekintetében ezen tulajdonságok alapvetően határozzák meg a megbízhatóságot, melynek meghatározása kulcsfontosságú a biztonságos faépítészeti tervezés érdekében.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a 2025-2.1.2-EKÖP-KDP-2025-00002. számú projekt a Tudományos és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a EKÖP-KDP pályázati program finanszírozásával valósult meg.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Hicke J. A., Zeppel B. J. B.: *Climate-driven tree mortality: Insights from the pinon pine die-off in*

the United States. New Phytologist, 200. (2013) 301–303.

- [2] Jaime L., Batllori E., Margalef-Marrase J., Navarro M. Á. P., Lloret F.: *Scots pine (Pinus sylvestris L.) mortality is explained by the climatic suitability of both host tree and bark beetle populations*. Forest Ecology and Management, 448. (2019) 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.070>
- [3] Molnár S., Farkas P.: *Nyár (nyár fajok) – Populus spp.* In: Földünk ipari fái (2nd ed.) (eds. Molnár S., Farkas P., Börcsök Z., Zoltán Gy., Photog, Richter H. G. & Szeles P.) Faipari Tudományos Egyesület, Sopron. 97–99. ISBN 978-963-12-5239-2.
- [4] Merela M., Čufar K.: *Mechanical properties of sapwood versus heartwood in three different oak species*. Drvna Industrija, 64/4. (2013) 323–334. <https://doi.org/10.5552/drind.2013.1325>
- [5] Bektaş İ., Tutuş A., Gültekin G.: *The effect of sapwood and heartwood differences on mechanical properties of fast-growing tree species*. Drvna Industrija, 71/3. (2020) 261–269. <https://doi.org/10.5552/drind.2020.1940>
- [6] Askenazi E. K.: *Anizotropia dreveszinü i drevesznüh materialov (A fa- és faalapú anyagok anizotrópiája)*. 1. kiadás. Lesznaja Promüslennoszty, Moszkva, 1978. 97–99.
- [7] EN ISO 13061-17: Physical and Mechanical Properties of Wood – Test Methods for Small Clear Wood Specimens. Part 17: Determination of Ultimate Stress in Compression Parallel to Grain. 2017.
- [8] EN ISO 13061-06: Physical and Mechanical Properties of Wood – Test Methods for Small Clear Wood Specimens. Part 16: Determination of Ultimate Tensile Stress Parallel to Grain. 2014.
- [9] Merela M., Čufar K.: *Mechanical properties of sapwood versus heartwood in three different oak species*. Drvna Industrija, 64/4. (2013) 323–334. <https://doi.org/10.5552/drind.2013.1325>
- [10] Bodig J.: *The Effect of Anatomy on the Initial Stress-Strain Relationship*. Forest Products Journal, 15/5. (1965) 197–202.
- [11] Bodig J., Jayne B. A.: *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1982. 297–305.
- [12] Szőke F., Tárkányi S., Kánnár A.: *Compression Strength Testing of Grey Poplar*. Acta Materialia Transylvanica, 8/2. (2025) 96–104. <https://doi.org/10.33924/amt-2025-02-09>
- [13] Szőke F., Kánnár A.: *Tensile Strength Analysis of Grey Poplar*. In: 12th Hardwood Conference Proceedings (eds. Németh R., Hansmann Ch., Militz H., Bak M., Báder M.). Sopron, 2026. 63–67.



Koponyaimplantátumok végeselemes modellezése és mechanikai értékelése

Finite Element Modeling and Mechanical Analysis of Skull Implants

Tichov Fruzsina,¹ Kovács Tünde Anna,² Kónya János,³ Vitanovics Dusán⁴

¹ Óbudai Egyetem, Anyagtudományi és Technológiai Doktori Iskola

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

³ Óbudai Egyetem, Anyagtudományi és Technológiai Doktori Iskola

⁴ Óbudai Egyetem, Anyagtudományi és Technológiai Doktori Iskola

Abstract

This study compares the biomechanical performance of a custom-made cranial implant made of titanium alloy (Ti6Al4V) and PEEK with that of natural cranial bone, using finite element modeling. For the simulation, we used a realistic skull and implant model generated from a patient's CT scan. During the modeling process, we performed surface modifications and automatic solid conversion using Meshmixer and Ansys software to ensure watertight geometry. We ran the simulation under critical loading conditions typical of skull implants, including a 50 N static load simulating forces during sleep and an intracranial pressure of 15 Hgmm. The analysis focused on total deformation and equivalent stress. The results showed that the titanium implant had the highest stiffness, while the PEEK implant proved to be the least stiff. The highest internal stress occurred in the titanium, but for all three materials tested, the stress remained well below the yield strength. This confirms that only elastic deformation occurs under the simulated load, meaning that both materials can be safely used under the tested 50 N load condition

Keywords: *finite element method (FEM), cranial implant, PEEK, titanium alloy.*

Összefoglalás

Ez a tanulmány titánötvözetből (Ti6Al4V) és PEEK-ből készült, személyre szabott koponyaimplantátum bio-mechanikai teljesítményét hasonlítja össze a természetes koponyacsontéval, végeselemes modellezést alkalmazva. A szimulációhoz egy páciens CT-vizsgálatából generált, valóságghű koponya- és implantátummodellt alkalmaztunk. A modellezés során felületmódosítást, valamint Meshmixer és Ansys szoftverekkel automatikus szilárd testté alakítást hajtottunk végre a „vízhatlan” geometria biztosítása érdekében. A szimulációt a koponyaimplantátumokra jellemző kritikus terhelési feltételek mellett futtattuk le, beleértve az alvás közbeni erőket szimuláló 50 N-os statikus terhelést, valamint a 15 Hgmm-es belső koponyaűri nyomást. A vizsgálat a teljes deformációra és az egyenértékű feszültségre összpontosított. Az eredmények rávilágítottak, hogy a titánimplantátumé a legnagyobb merevség, míg a PEEK-implantátum bizonyult a legkevésbé merevnek. A legnagyobb belső feszültség a titánnál jelentkezett, azonban mindhárom vizsgált anyag esetében a feszültségek jóval a folyáshatár alatt maradtak. Ez igazolja, hogy a szimulált terhelés mellett kizárólag rugalmas deformáció lép fel, így mindkét anyag biztonságosan alkalmazható a vizsgált 50 N-os igénybevétel esetén.

Kulcsszavak: *végeselemes módszer (FEM), koponyaimplantátum, PEEK, titánötvözet.*

1. Irodalomáttekintés a koponya-csont-implantátumokról

1.1. Az implantátumok geometriája és anyagai

A koponyaimplantátum geometriájának megtervezése az idegsebészet és a biológiai anyagok tudományának egyik kulcsfontosságú lépése. Az elsődleges cél a koponya szerkezeti integritásának helyreállítása és a kiváló esztétikai eredmény elérése. A geometria kialakítása során fókuszban van a páciensre szabott tervezés, és a szabványos lemezekre túlmutatva az egyénre szabott implantátumok megalkotása.

1.1.1. A koponyaimplantátumok geometriája

A koponyaimplantátum geometriája a koponyahibák helyreállítására használt implantátum fizikai alakját, vastagságát és határfelületi jellemzőit jelenti. Az ízületekben alkalmazott hagyományos, szabványosított implantátumokkal ellentétben a koponyaplasztika nagyfokú egyedi kialakítást igényel, mivel minden koponyahiba egyedi.

A koponyaimplantátumok tervezése során gondosan figyelembe kell venni mind a geometriát, mind az anyag tulajdonságait az optimális biomechanikai és biológiai eredmények elérése érdekében.

A koponyaimplantátum geometriáját általában számítógépes tervezés segítségével állítják elő, a gyártáshoz szükséges geometria a következő lépésekkel hozható létre:

Képfeldolgozás és szegmentálás

- A páciens koponyájáról készült CT-felvételeket DICOM-formátumban rögzítik.
- A képeket speciális szoftverekkel (pl. 3D Slicer, Mimics) dolgozzák fel a szegmentálás elvégzéséhez, elkülönítve a kompakt csontot és a koponyadeformitást.
- Ezt a szegmentált geometriát STL-fájlba konvertálják, amely a felület háromszögekből álló hálós ábrázolása.

Az implantátum tervezése

Tervezői szoftverekkel (Autodesk Meshmixer, Geomagic, Materialise Mimics) az implantátum geometriáját úgy tervezik meg, hogy az visszaállítsa a koponya természetes kontúráját. A leggyakoribb módszerek a következők:

- Tükrözés: a koponya sérülésmentes oldalát tükrözik a sérült oldalra, a hiányzó rész rekonstruálása érdekében, feltételezve a koponya szimmetriáját.

- Spline-os algoritmusok: interpoláció alkalmazásával rekonstruálják a hiányt a környező egészséges csontélek alapján.
- A végső implantátum alakját az eredeti, hiányos koponyamodell és a teljes, rekonstruált modell kivonásával kapják meg [1].

1.1.2. A koponyacsont és a koponyaimplantátum anyagtulajdonságai

A koponyacsont jellemzői

A koponyacsont réteges szerkezetű: a kortikális belső rétegből és egy ugyanazon kortikális külső rétegből áll, amelyeket a porózus diploé (szivacsos szövet) réteg választ el egymástól. A kompakt csont sűrű, kalciumban gazdag szövet, amely minden csont külső rétegét képezi, és körülveszi a szivacsos csontot. A csont legtöbbször inkább merev anyagként viselkedik.

Az emberi koponya körülbelül huszonnyolc csontból áll, amelyek többsége varratokkal van összekötve. A varratok rugalmas ízületek, amelyek lehetővé teszik a csontok egyenletes növekedését az agy növekedésével és a koponya túlterhelésével. Az emberi koponyában tizenhárom varrat található, amelyek közül négy a fő varrat: a koronális, a sagittális, a squamális és a lambdoid varrat. A kortikális és a szivacsos csont aránya a fej különböző részein eltérő, és ez a pecsvörkre emlékeztető szerkezet nehezen követhető nyomon. A koponyacsont vastagsága a különböző részekben eltérő, de átlagosan 5 és 7,8 mm közötti vastagsággal számolhatunk, amiből a külső és a belső kortikális csont vastagsága 1–2,6 mm, tehát a szivacsos csontréteg vastagsága 3 és 5,8 mm között mozog [2].

1. táblázat. A koponyacsont jellemzői [2]

Anyag megnevezése	Sűrűség (kg/m ³)	Rugalmasági modulus (MPa)	Poisson-tényező	Szakítószilárdság (MPa)
Kortikális csont	934	500–800	0,21	114
Szivacsos csont	1500	1000	0,05	4,80

A koponyaimplantátumoknál alkalmazott anyagok

A koponyaimplantátumok gyártásához általában fémeket használnak, például Ti6Al4V titánötvezetet (a továbbiakban: titán). Manapság azonban a polimerek (például PEEK, PMMA, UHMW-PE, HDPE) is egyre népszerűbbek, mivel tulajdonságaik szabályozhatók. Ezenkívül rugalmasági modulusuk közelebb áll a természetes csontéhoz,

mint a fémeké, továbbá CT- és MRI-vizsgálatok során nem okoznak képzavarokat.

2. táblázat. A koponyaimplantátumokhoz használt főbb anyagok

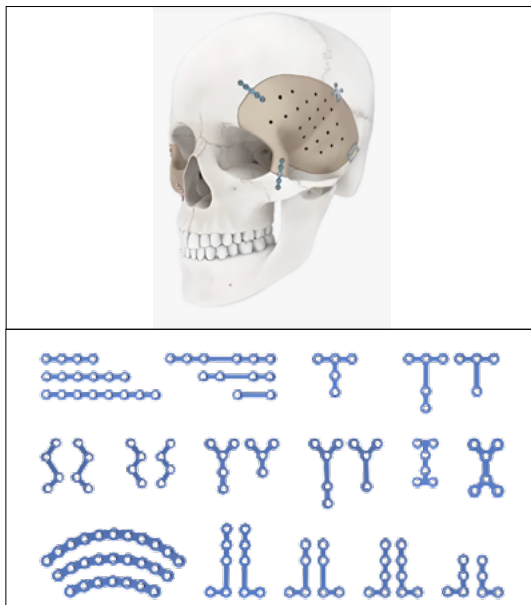
Anyag megnevezése	Sűrűség (kg/m ³)	Rugal- massági modulus (MPa)	Poisson- tényező	Szakító- szilárd- ság (MPa)
UHMW-PE [3, 4]	934	500–800	0,46	21–28
PEEK [5]	1360	4000	0,4	100
Titán (Ti6Al4V) [6, 7]	4430	114 000	0,33	1100

Összegzésként elmondható, hogy mind az implantátum geometriája, mind az anyagválasztás döntő fontosságú tényező a beültetett koponyaimplantátumok sikerességében. A képkalkotás, a CAD/CAM és az anyagtudomány terén elért fejlődés lehetővé teszi olyan implantátumok kifejlesztését, amelyek mind alakjukban, mind funkciójukban jobban utánozzák a természetes koponyát. Ugyanakkor mindegyik megközelítésnek megvannak a maga előnyei és korlátai, amelyeket a klinikai döntéshozatal során figyelembe kell venni [8].

1.2. Terhelés és a csont-implantátum kölcsönhatások

A mechanikai terhelés a koponyaimplantátumok stabilitását és élettartamát meghatározó kritikus tényező. Az implantátum és a környező csont közötti kölcsönhatást elsősorban az implantátum geometriai kialakítása, a terhelési körülmények, valamint az implantátum és a csont anyagjellemzői határozzák meg. Terhelés hatására a rögzítőelemek és a csont implantátummal érintkező felülete felelős ezeknek az erőknek az elnyeléséért, ami viszont befolyásolja mind az implantátum, mind a szomszédos csontszövet által tapasztalt feszültséget és alakváltozást.

A biomechanikai teljesítményértékelések pontossága nagymértékben függ a számítási modellekben felhasznált adatok minőségétől. Mivel a csont „in vivo” szerkezeti tulajdonságai gyakran bizonytalanok, csak korlátozott megbízhatósággal jósolhatók meg, ezért a koponyaimplantátumok stabilitása és funkcionalitása szorosan összefügg a csont, az implantátum és a rögzítőcsavarok közötti mechanikai kölcsönhatással, és e kölcsönhatások átfogó megértése elengedhetetlen az implantátumok tervezésének és a klinikai eredmények optimalizálásához [9].



1. ábra. Az implantátum rögzítése a koponyához és gyakori rögzítőelemek [10, 11]

1.2.1. Rögzítés

A szimulációban a geometriának stabilnak kell lennie, hogy megakadályozza a koponya bármely irányba történő elmozdulását, ami az Ansys szoftverben rögzített támaszték használatával valósítható meg. Emellett koponyaműtét során az implantátumot a koponyacsonthoz szükséges rögzíteni. Erre a célra az orvosok általában rögzítőlemezeket vagy -lapokat használnak, amelyeket titánötvözetből készült rögzítőcsavarokkal rögzítenek [9]. Az implantátum geometriája határozza meg a csavarlyukak elhelyezkedését és számát. Ezeknek a rögzítési pontoknak a helyzete jelentősen befolyásolja a külső erők hatására az implantátumon és a környező csonton kialakuló feszültségeloszlást (1. ábra) [12].

1.2.2. Terhelés

Koponyaűri nyomás

A koponyaüreget fiziológiás körülmények között állandó, megközelítőleg 15 Hgmm értékű intrakraniális nyomás jellemzi. Ezt a belső terhelést a végeselemes szimuláció során a koponya és az implantátum belső felületére kifejtett nyomásértékként „Pressure” paranccsal lehet modellezni [9].

Külső hatás miatti terhelés

Három különböző, életszerű ütközési esetet említhetünk:

1. Az implantátum közepére alvás közben ható, statikus 50 N erő. Ezen erőhatás alkalmazásával a szoftver szimulálni tudja az alvás során fellépő, implantátumra és koponyára ható terhelést [13].

2. A 2000 N-os erő alkalmazása a koponyára, ami a környező szövetekre gyakorolt közepes vagy súlyos, de nem extrém ütközés mechanikai reakcióit mutatja be [14].

3. Idegen tárgy ütközése által okozott statikus terhelés szimulálásához 8000 N-os erőt szükséges alkalmazni a szoftverben a koponya egy adott részére [14].

2. A modellezési lehetőségek áttekintése

2.1. Tömör 3D-s geometriák létrehozása

2.1.1. A visszamodellezés és felületillesztés alkalmazása

A felületillesztéses fordított mérnöki tevékenység olyan módszer, amely a nyers digitális szkennelési adatokat (jellemzően hálós modelleket, például STL-fájlokat) szerkeszthető, matematikailag pontos, CAD-térbeli modellekké (például STEP- vagy IGES-fájlokká) alakít át. A folyamat közepontjában álló felületillesztés során olyan analitikus vagy szabadformájú felületeket hoznak létre, amelyek pontosan közelítik a hálós geometriáját.

A módszer lépései

1. A nyers szkennelési adatok (STL, OBJ vagy PLY) importálása a szoftverbe.

2. A zaj, a lyukak és a hibás topológiájú geometria eltávolítása.

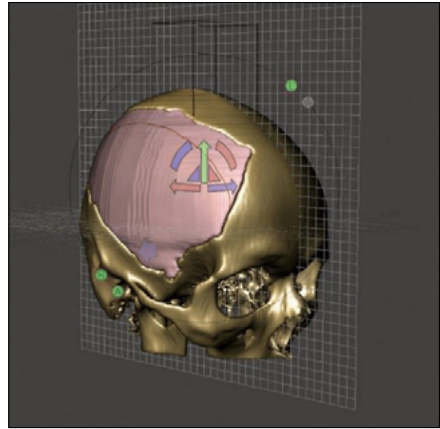
3. Jellemzők és régiók szegmentálása: a szoftver elemzi a hálós geometriáját, hogy automatikusan szegmentálja (elválassza) azt különálló geometriai régiókra.

4. Felületillesztés (kivonás és modellezés): a szoftver kivonja azokat a pontos matematikai elemeket (síkok, hengerek, gömbök stb.), amelyek a legjobban illeszkednek a hálós kiválasztott régióhoz.

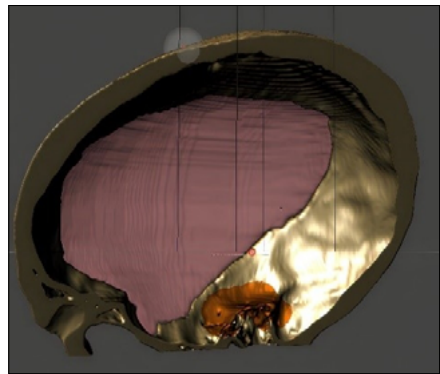
5. Szilárd modell generálása a „Trim and Knit” funkcióval: az egyes kivont felületeket levágják és meghosszabbítják, hogy azok egymáshoz igazodjanak és éleik egymáshoz illeszkedjenek. Ezeket a levágott felületeket ezután összekötik, hogy egyetlen zárt felületű testet hozzanak létre [15].

2.1.2. Felület-előkészítés és automatikus konvertálás

Először a koponyaimplantátumot és a koponya STL-fájlt beimportáljuk a Meshmixer szoftverbe. Ezt követően a „Plane Cut” paranccsal el kell tá-



2. ábra. „Plane Cut” parancs a Meshmixer szoftverben



3. ábra. „Erase + Fill” parancsok a Meshmixer szoftverben

volítani a koponyacsont nagyobb részét (2. ábra).

Ekkor az implantátumnak és a koponyacsont részének lekerekített, kevésbé éles és töredezett felületűnek kell lennie. Ezért a Meshmixer szoftverben az „Erase + Fill” és a „Smooth” parancsokat lehet alkalmazni (3. ábra).

A felület módosítása után a koponyaimplantátumnak és a koponyacsont egy részének teljesen zártnak kell lennie, amire a Meshmixer szoftverben a „Close Crack” parancs alkalmazható.

Az utolsó lépés a kiválasztott komponenseken a „Make Solid” funkció alkalmazása, amely garantálja a szilárd és tömör testgeometriát, ez alapvető feltétele a sikeres végeselemes szimulációnak.

Az „Inspector” funkcióval a geometria elemezhető, és a fájl hiányzó részei pótolhatók.

A munka során a Meshmixer automatikus szilárd/tömör test létrehozása nem volt elegendő ahhoz, hogy szilárd és tömör geometriát kapjunk, ezért az Ansys szoftverben is alkalmaztunk az implantátumra és a koponyarészre egy automatikus parancsot a szilárd testté konvertáláshoz.

3. Végeselemes modell definiálása, a szimuláció előkészítése, végrehajtása és az eredmények elemzése

A jelen tanulmány célja a PEEK és a titán koponyaimplantátumok teljesítményének értékelése volt a természetes koponyacsontéhoz viszonyítva, 50 N-os statikus terhelés mellett, amely az alvász közötti erőhatásokat szimulálja.

3.1. Alkalmazott modell

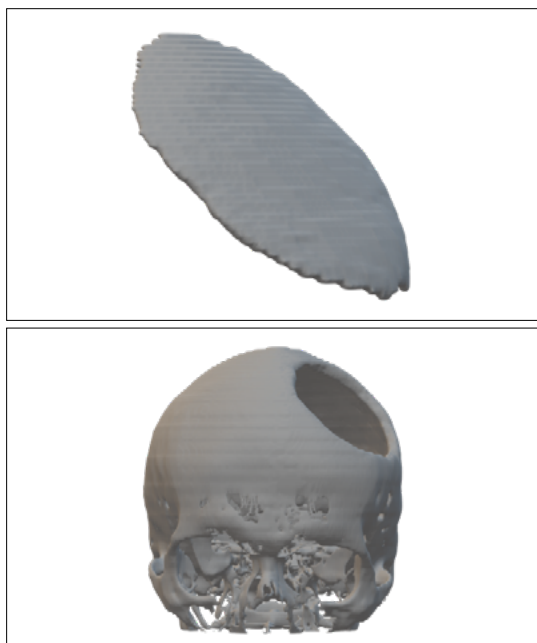
Az implantátum és a koponya modellje egy valós esetből származik, amely során a páciens koponyájáról CT-felvétel készült. A CT-vizsgálattal létrehozott DICOM-fájlból STL-fájlt generáltunk, majd ezt az STL-fájlt használtuk fel a szimulációhoz (4. ábra).

3.2. Az alkalmazott anyagok

3.2.1. Koponyacsont

A koponyavarratok elhelyezkedése befolyásolja a csont mechanikai tulajdonságait, azonban a jelen esetben alkalmazott koponyaanyag-modellben ezt, a modellezés és a nyomon követés nehézségei miatt, figyelmen kívül hagytuk.

Egy további egyszerűsítési módszer volt a homogén koponyaanyag használata, lineárisan rugalmas anyagi viselkedést feltételezve. A homogenizált koponyacsont mechanikai viselkedése az alább összefoglalt anyagi jellemzőkkel írható le.



4. ábra. A végeselemes szimulációhoz használt koponyaimplantátum és sérült koponya

3. táblázat. A csont részekhez használt anyag

Anyag megnevezése	Sűrűség (kg/m ³)	Rugalmasági modulus (MPa)	Poisson-tényező	Szakítószilárdság (MPa)
Egyszerűsített koponyacsont	1800	6000	0,21	77,6

Szintén fontos kiemelni, hogy a szimuláció során a koponyarészhez minden esetben az „egyszerűsített koponyacsontanyagot” rendeltük hozzá, és csupán az implantátum anyagát változtattuk az egyes esetekben.

3.2.2. Koponyaimplantátum

A 2. táblázatnak megfelelően a koponyaimplantátumhoz egy polimer (PEEK) és egy fém (Ti-6Al4V) alapanyagot választottunk, mindkét anyag a leggyakrabban alkalmazott megoldások közé tartozik a kranioplasztikában.

3.3. Peremfeltételek

Az Ansys szoftverben a peremfeltételek olyan kényszerek vagy alkalmazott értékek (például erők, hőmérsékletek, sebességek vagy feszültségek), amelyek meghatározzák a modell viselkedését annak peremén vagy kulcsfontosságú pontjain.

3.3.1. Rögzítés

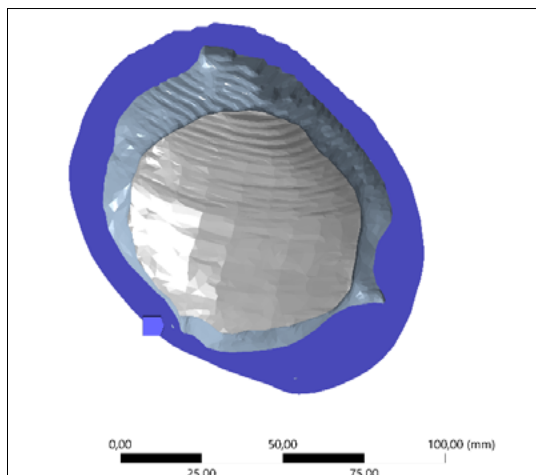
Ebben a szimulációban feltételeztük, hogy a koponya és a koponyaimplantátum összeintegrációja már végbement. Így az implantátum és a koponya között kötött kapcsolatot határoztunk meg, amelyet korábban a Meshmixer szoftver „Combine” parancsával készítettünk elő.

A teljes geometria elmozdulásának elkerülése érdekében a koponya vágott felületein rögzítést alkalmaztunk: az úgynevezett „Fixed Support” parancs zérus elmozdulást és elfordulást biztosított (5. ábra).

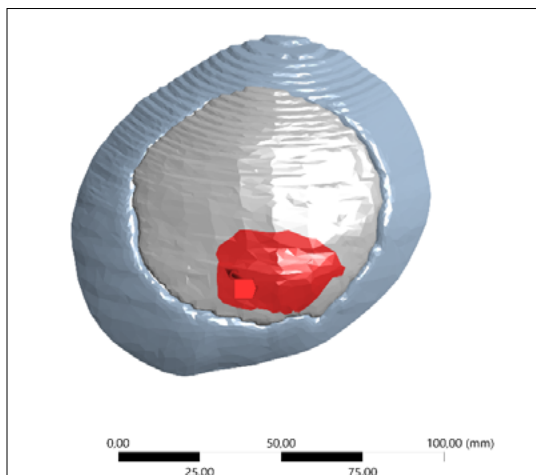
Ebben az esetben a rögzítőlemezek alkalmazásától eltekintettünk, mivel azok importálása jelentősen növelte volna az amúgy is komplex koponyaimplantátum és koponyacsont szimulációt. A csont és az implantátum interfész modellezése geometriai egységként történt érintkezési („Contacts”) kapcsolatok definiálásával, szimulálva az összeintegrációt követő szerkezeti folytonosságot (6. ábra).

3.3.2. A koponyát és az implantátumot érő erőhatás

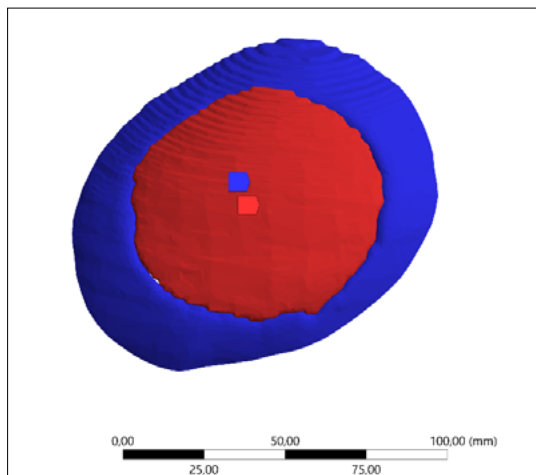
A koponyát és az implantátumot érő hatást egy, az alvást szimuláló körülmény alapján értékel-



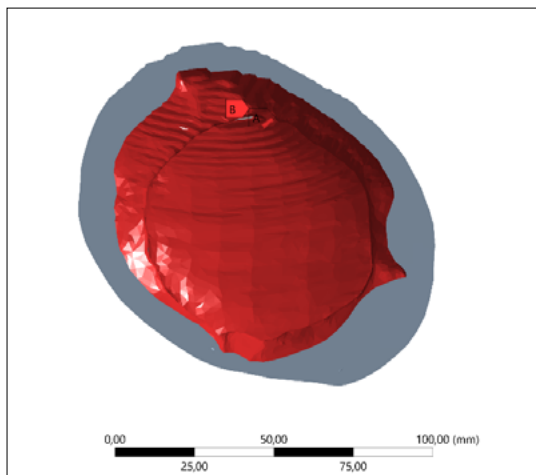
5. ábra. „Fixed Support” alkalmazása a koponyarészen Ansys szoftverben



7. ábra. Az 50 N nagyságú terhelőerő bevezetésére kijelölt felületi zóna (piros színnel kiemelve) Ansys szoftverkörnyezetben, ahol az alsó metrikus skála (0,00–100,00 mm) a terhelt tartomány valós kiterjedésének számszerűsítését szolgálja



6. ábra. Kötött („Bonded”) érintkezési feltétel definiálása és vizualizációja Ansys szoftverkörnyezetben az implantátum (piros színnel kiemelve) és a környező koponyarész (kék színnel kiemelve) csatlakozási határfelületén



8. ábra. A nyomás („Pressure”) eloszlása a koponya és az implantátum belső felületén, a pirossal jelölt régiók a terhelt felületeket mutatják Ansys szoftverben

tük, amely során 50 N külső erőt alkalmaztunk az implantátum felületére merőlegesen, az agy irányába mutatva (7. ábra).

3.3.3. Intrakraniális nyomás

A koponyaüregben fellépő koponyaüri nyomás (ICP) modellezéséhez nyomásterhelést alkalmaz-

tunk az implantátum belső felületére. A felület kijelölése az „Element Face” eszközzel történt, majd az „Extend” funkcióval fokozatosan kiterjesztettük a kijelölést a meghatározott határvonalig, biztosítva a teljes belső geometria pontos terhelését (8. ábra).

3.3.4. A hálózás

Az Ansys hallgatói verziójának fizikai típustól függően meghatározottak az elem- és cellakorlátai, ami mechanikai szimulációk esetén 128 000 elemet vagy csomópontot jelent [16].

A koponya és az implantátum geometriájának jelentősége miatt a modell túlzott egyszerűsítése helyett az STL-fájl elemszámát csökkentettük az Ansys szoftverbe történő importálás és a szilárd testté alakítás előtt (9. ábra).

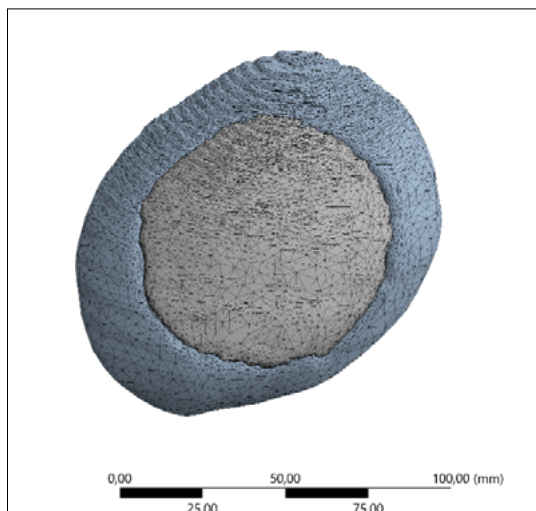
A hálózáshoz program által vezérelt („Program Controlled”) beállítást alkalmaztunk, 12 mm-es elemmérettel. Az előzetes hálóérzékenységi vizsgálat azt mutatta, hogy a tetraéder elemek biztosítják az optimális konfigurációt ehhez a specifikus geometriához. A kapott végeleemes modell 46 460 elemből és 82 942 csomópontból állt.

4. Eredmények

A szimuláció során az egyenértékű feszültséget (von Mises-feszültség) és a teljes deformációt vizsgáltuk.

Az egyenértékű feszültség (von Mises-feszültség) azt ellenőrzi, hogy az implantátumban és a környező csontszövetben kialakuló maximális feszültség meghaladja-e az anyag folyáshatárát.

A leggyakrabban von Mises-feszültségként számított egyenértékű feszültség a legkritikusabb skaláris érték, amellyel leírható a koponyaimplantátum és a környező csontszövet összetett, többirányú feszültségi állapota. Segítségével már a tervezési folyamat során előre jelezhető az implantátum szerkezeti integritása és hosszú távú stabilitása.



9. ábra. A modell a hálógenerálás után

Amennyiben a számított von Mises-feszültség az implantátum bármely pontján meghaladja az anyag folyáshatárát, az implantátum várhatóan maradót alakváltozást szenved vagy szerkezeti hibát mutat.

A teljes deformáció az implantátum vagy a környező csont bármely pontjának maximális elmozdulását vagy alakváltozását jelenti mindhárom irányban (X, Y és Z tengelyek mentén).

Ez az érték kulcsfontosságú az implantátum elsődleges funkciójának, az alatta lévő agyszövet védelmének értékeléséhez. A nagymértékű teljes elmozdulás azt jelenti, hogy az implantátum túlságosan benyomódik, ami egy esetleges behatás során közvetlen érintkezéshez vagy túlzott nyomáshoz vezethet az agyon, növelve a neurológiai sérülés kockázatát.

A teljes deformáció értelmezése az Ansys nagy elmozdulási (Large Deflection / geometriai nemlinearitás) analíziseiben alapvetően eltér a standard lineáris (kis elmozdulási) elemzéstől. A nagy elmozdulás opció bekapcsolása (az Ansys Mechanical Analysis Settings menüpontja alatt) nemlineáris megoldást indít el, ami elengedhetetlen az eredmények pontosságához, ha a deformációk mértéke vagy a rotáció szöge már megváltoztatja a szerkezet merevségét és a terhelés útját [17].

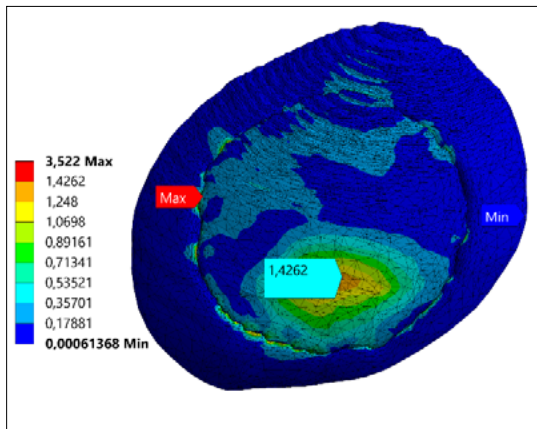
Jelen szimulációk során a „Large Deflection” funkció be volt kapcsolva.

A koponya anyagmodellje 50 N-os terhelés mellett látható a 10. és a 11. ábrán.

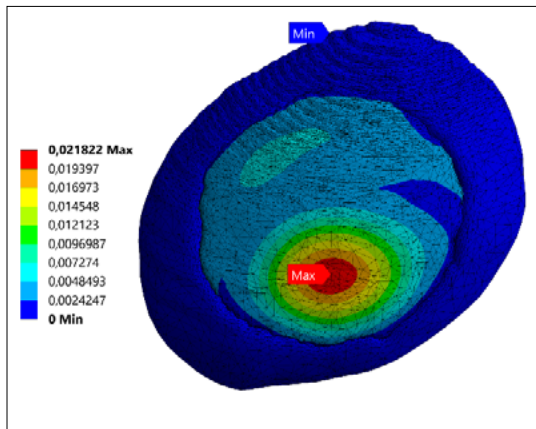
A PEEK-implantátum 50 N-os terhelés mellett a 12. és 13. ábrákon látható, a titánimplantátum 50 N-os terhelés mellett pedig a 14. és 15. ábrákon.

Minden szimuláció és minden vizsgált anyag esetében az automatikusan meghatározott egyenértékű feszültség („Equivalent Stress”) maximum értéke numerikus hibából adódott. A reális maximális feszültséget manuálisan határoztuk meg.

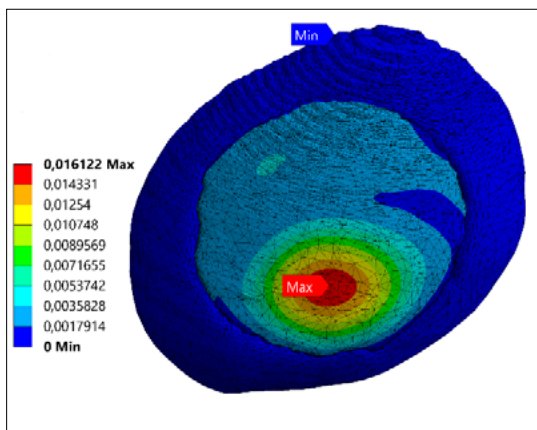
A vizsgált modellek 50 N nagyságú statikus terhelése mellett kapott numerikus eredményeket a 4. táblázat foglalja össze. A teljes alakváltozás („Total Deformation”) eloszlása alapján a titánimplantátum mutatta a legnagyobb merevséget, amely mindössze 0,0017 mm-es maximális elmozdulást eredményezett. Ezzel szemben a PEEK-implantátum bizonyult a leginkább rugalmasnak, a kapott 0,0218 mm-es maximális deformációja több mint tizenkétszerese a titánénak. A koponyacsont elmozdulása a két vizsgált anyag értékei közé esett (0,0161 mm). Az eredmények igazolják, hogy a minimális elmozdulást és nagy pontosságu illesztést igénylő klinikai esetekben a titán alkalmazása biztosítja a legnagyobb szerkezeti stabilitást.



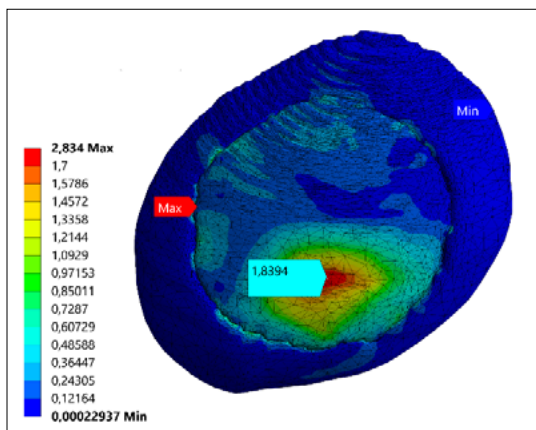
10. ábra. A koponya anyagmodell egyenértékű (von Mises-) feszültsége 50 N erőhatás alatt (MPa)



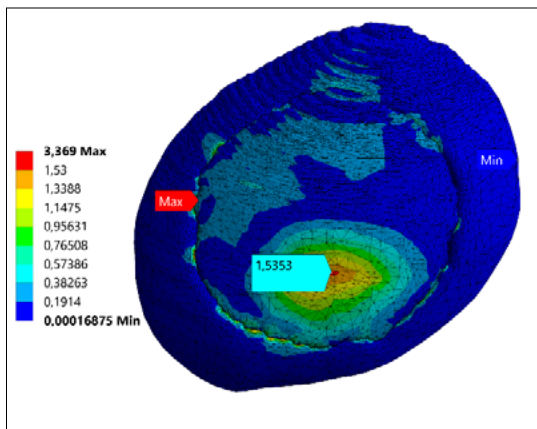
13. ábra. PEEK-implantátum teljes deformációja 50 N erőhatás alatt (mm)



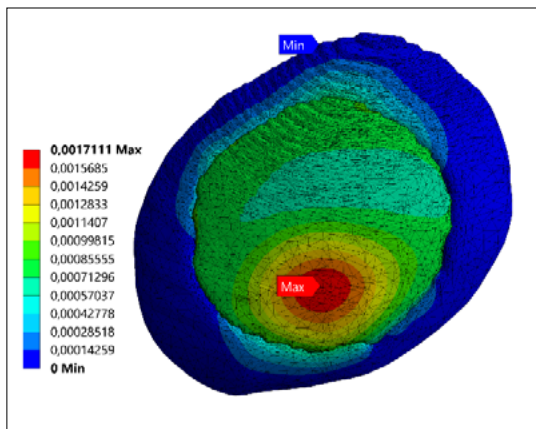
11. ábra. A koponya anyagmodell teljes deformációja 50 N erőhatás alatt (mm)



14. ábra. Titánimplantátum egyenértékű (von Mises-) feszültsége 50 N erőhatás alatt (MPa)



12. ábra. PEEK-implantátum egyenértékű (von Mises-) feszültsége 50 N erőhatás alatt (MPa)



15. ábra. Titánimplantátum teljes deformációja 50 N erőhatás alatt (mm)

4. táblázat. Különböző anyagokból készült koponya-implantátumok 50 N statikus terhelés melletti szimulációs eredményeinek összefoglalása

Anyag	Teljes deformáció (mm)			Egyenértékű feszültség (MPa)		
	Koponya	PEEK	Titán	Koponya	PEEK	Titán
Legkisebb érték	0	0	0	0,0006	0,0001	0,0002
Legnagyobb érték	0,0161	0,0218	0,0017	1,4262	1,5353	1,8394

A teljes alakváltozás („Total Deformation”) eloszlása alapján a titánimplantátum mutatta a legnagyobb merevséget, amely mindössze 0,0017 mm-es maximális elmozdulást eredményezett. Ezzel szemben a PEEK-implantátum bizonyult a leginkább rugalmasnak, a kapott 0,0218 mm-es maximális deformációja több mint tizenkétszerese a titánénak. A koponyacsont elmozdulása a két vizsgált anyag értékei közé esett (0,0161 mm). Az eredmények igazolják, hogy a minimális elmozdulást és nagy pontosságú illesztést igénylő klinikai esetekben a titán alkalmazása biztosítja a legnagyobb szerkezeti stabilitást.

Ansys környezetben az egyenértékű feszültség (von Mises-feszültség) eloszlását tekintve a titánimplantátumban ébredt a legnagyobb mechanikai feszültség (1,8394 MPa), ami közvetlen következménye az anyag kiemelkedő merevségének. A merevebb anyagok (kisebb deformáció) általában nagyobb terhelést viselnek el, ami nagyobb feszültségértékekhez vezet. Ezzel szemben a PEEK (1,5353 MPa) és a koponyacsont (1,4262 MPa) maximális feszültség szintje ennél csekélyebb értéket mutatott. Mivel az indukált mechanikai feszültségek mindhárom vizsgált struktúrában messze elmaradnak az anyagokra jellemző folyáshatártól (pl. a PEEK esetében a 100 MPa-os határértéktől [5]), a mechanikai tönkremenetel kockázata gyakorlatilag elhanyagolható.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy mindhárom anyag jóval a folyáshatára alatt üzemel, így az anyagokban kizárólag rugalmas deformáció lép fel, ami a terhelés megszűnése után teljesen eltűnik, maradó alakváltozást nem okozva.

5. Következtetések

A kapott numerikus feszültségértékek egyértelműen igazolják, hogy az implantátumok anyagai alvási pozícióban is messze a folyáshatár alatti,

biztonságos tartományban üzemelnek. Mivel a terhelés hatására kizárólag visszaalakuló, rugalmas deformáció jön létre, a tanulmány igazolja, hogy normál funkcionális terhelés (alvás) mellett mindkét anyag tökéletesen és biztonságosan képes helyettesíteni a hiányzó koponyacsontot, mivel a feszültségek messze elmaradnak a kritikus tönkremeneteli határoktól.

Az eredmények alapján a PEEK polimer mechanikai viselkedése áll közelebb a természetes koponyacsontéhoz. A PEEK által elszenvedett 0,0218 mm-es maximális elmozdulás alig tér el a homogén csontmodellnél mért 0,0161 mm-es értéktől, míg a rendkívül merev titánimplantátum szinte teljesen merev testként viselkedik (0,0017 mm-es elmozdulás). Ez azt jelenti, hogy a PEEK rugalmassága jobban képes utánozni a koponya természetes fiziológiás mozgásait.

Az anyagtulajdonságok és a szimulált eredmények mérlegelése alapján a titánötvözet alkalmazása ott indokolt, ahol a legfőbb cél az agyszövet abszolút védelme és a minimális implantátumelmozdulás. Ezzel szemben a PEEK optimálisabb biomechanikai alternatívát nyújt a természetes csontot utánzó rugalmasságával és kedvezőbb terhelésátadási karakterisztikájával.

A jövőbeni kutatások során érdemes lenne a rögzítőcsavarok szimulációját is bevonni a vizsgálatba, valamint nagyobb terhelések mellett elemezni a geometriát, hogy feltérképezhető legyen a deformáció és a feszültség alakulása különböző igénybevételek esetén.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Moncayo-Matute F. P., Peña-Tapia P., Silva E. V., Torres-Jara P. B., Moya-Loaiza D. P., Abad-Farfán G. & Andrade-Galarza, A. F.: *Surgical planning and finite element analysis for the neurocraneal protection in cranioplasty with PMMA: A case study*. Heliyon, 8/9. (2022) e10706. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10706>
- [2] Barbosa A. R. L., Fernandes F. A. O., De Sousa R. J. A., Ptak M., Wilhelm J.: *Computational modeling of skull bone structures and simulation of skull fractures using the YEAHM head model*. Biology, 9/9. (2020) 267. <https://doi.org/10.3390/biology9090267>
- [3] Hussain M., Naqvi R. A., Abbas N., Khan S. M., Nawaz S., Hussain A. et al.: *Ultrahigh-molecular-weight-polyethylene (UHMWPE) as a promising polymer material for biomedical applications: A concise review*. Polymers, 12/2. (2020) 323. <https://doi.org/10.3390/polym12020323>
- [4] MatWeb. (n.d.). Westlake Plastics Lennite® GUR1050 (Type II) UHMW-PE for medical applications. <http://www.matweb.com>

- [5] Bogu V. P., Kumar Y. R., Khanra A.: *Modelling and structural analysis of customized cranial implant*. Materials Today: Proceedings, 4/2. (2017) 1134–1139.
- [6] Lovas L.: *Csavarékötés modellezésének kérdései* [Notes on bolted link modelling]. GÉP, 69/4. (2018) 14–17.
http://real-j.mtak.hu/20277/4/gep_2018_69_4_.pdf
- [7] MatWeb. (n.d.). Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), STA. <http://www.matweb.com>
- [8] Marcián P., Narra N., Borák L., Chamrad J., Wolff J.: *Biomechanical performance of cranial implants with different thicknesses and material properties: A finite element study*. Computers in Biology and Medicine, 109. (2019) 137–145.
<https://doi.org/10.1016/j.compbio.2019.04.032>
- [9] Marcián P., Borák L., Zikmund T., Horáčková L., Kaiser J., Joukal M., Wolff J.: *On the limits of finite element models created from (micro)CT datasets and used in studies of bone-implant-related biomechanical problems*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 117. (2021) 104393.
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104393>
- [10] DePuy Synthes. TRUMATCH™ CMF PEEK milled implants. (letöltve: 2026. március 22.).
<https://www.jnjmedtech.com/en-US/product/trumatch-cmf-peek-milled-implants>
- [11] TST Orthopedics. (n.d.). Mini plate CMF. <https://tstorthopedics.com/en/urun/mini-plate-cmf/> (letöltve: 2026. március 22.).
- [12] Moiduddin K., Darwish S., Al-Ahmari A., Elwattidy S., Mohammad A., Ameen W.: *Structural and mechanical characterization of custom design cranial implant created using additive manufacturing*. Electronic Journal of Biotechnology, 29. (2017) 22–31.
<https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2017.06.005>
- [13] Haque F., Luscher A. F., Mitchell K. S., Sutradhar A.: *Optimization of fixations for additively manufactured cranial implants: Insights from finite element analysis*. Biomimetics, 8/6. (2023) 498.
<https://doi.org/10.3390/biomimetics8060498>
- [14] Moncayo-Matute F. P., Vázquez-Silva E., Peña-Tapia P. G., Torres-Jara P. B., Moya-Loaiza D. P., Viloria-Ávila T. J.: *Finite element analysis of patient-specific 3D-printed cranial implant manufactured with PMMA and PEEK: A mechanical comparative study*. Polymers, 15/17. (2023) 3620.
<https://doi.org/10.3390/polym15173620>
- [15] Siemens. (n. d.). Reverse engineering tutorial part 1: Get your feet wet. Solid Edge Blog. <https://blogs.sw.siemens.com/solidedge/reverse-engineering-tutorial-part-1-get-your-feet-wet/> (letöltve: 2026. március 22.).
- [16] Ansys. (n.d.). Ansys student. Academic Program. <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student> (letöltve: 2026. március 22.).
- [17] Ansys. (n.d.). Large deformation effects. Ansys Help Center. (letöltve: 2026. március 22.).
https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=///Views/Secured/corp/v252/en/wb_sim/ds_Large_Deformation.html



Különböző belső struktúrájú szubperiosteális implantátumok extrém terhelés alatti vizsgálata

Extreme Loading Analysis of Subperiosteal Implants with Different Internal Structures

Vörös Ádám,¹ Lőrincz Balázs²

¹ Széchenyi István Egyetem, Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Anyagtudományi és Technológiai Tanszék, Győr, Magyarország, voros.adam@hotmail.com

² Széchenyi István Egyetem, Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Anyagtudományi és Technológiai Tanszék, Győr, Magyarország, balazs.lorincz@virtualitica.com

Abstract

This study evaluates whether the applied fixation system used for testing subperiosteal implants provides reliable results under mechanical loading. The investigation considered the possibility that the fixation setup may fail earlier than the titanium implant itself. An idealized implant model with different internal structures was analyzed using finite element simulations and experimental tests combined with CT-based evaluation. Three loading cases were applied, including an extreme loading scenario introduced specifically to validate the fixation system. The results showed that no deformation occurred in either the implant or the fixation system under clinically relevant loading conditions. Failure was observed only under extreme loads significantly exceeding physiological bite forces. In such cases, the adhesive interface was identified as the weakest component, rather than the implant itself. These findings confirm that the applied fixation method is suitable for mechanical testing within the clinically relevant load range.

Keywords: *custom implant, extreme loading, simulation, finite element analysis.*

Összefoglalás

Jelen kutatás célja annak vizsgálata volt, hogy az alkalmazott befogási rendszer alkalmas-e a szubperiosteális implantátumok megbízható mechanikai vizsgálatára. A vizsgálat során felmerült annak lehetősége, hogy a befogás esetleg hamarabb károsodik, mint maga az implantátum. A különböző belső struktúrájú, idealizált mintákat végelem-analízissel és kísérleti terhelésekkel, CT-alapú összehasonlítással vizsgáltuk. A három terhelési eset közül a harmadik extrém vizsgálatot kifejezetten a befogási rendszer ellenőrzésére vezettük be. Az eredmények alapján klinikailag releváns terhelési tartományban sem az implantátum, sem a befogás nem mutatott károsodást. Tönkremenetel csak jelentősen megnövelt, nem életszerű terhelések mellett következett be. Ilyen esetben is a ragasztott kapcsolat bizonyult a gyenge pontnak. Megállapítható, hogy az alkalmazott befogási rendszer alkalmas a vizsgálatok elvégzésére.

Kulcsszavak: *egyedi implantátum, extrém terhelés, szimuláció, végelem-analízis.*

1. Bevezetés

A modern 3D-s nyomtatási eljárásoknak és a fejlett képfeldolgozásnak köszönhetően a betegspecifikus szubperiosteális rendszerek reneszánszukat élik, és a végelem-analízis az egyik legfontosabb eszközzé vált ezen implantátumok mechanikai

viselkedésének értékelésében. Pellegrino és munkatársai kutatása például kimutatta, hogy a csavarok elhelyezkedése, száma és az implantátum geometriai kialakítása jelentősen befolyásolja a csonton és az implantátumon kialakuló feszültségeloszlást, különösen előreirányuló terhelés ese-

tén, ahol a kritikus csontzónákban 50 MPa feletti húzófeszültségek is kialakulhatnak. A tanulmány arra is rámutatott, hogy a hátsó csavarok hozzáadása vagy a kapcsolatok áttervezése csökkentheti a feszültségkoncentrációt és növelheti a rendszer hosszú távú stabilitását [1].

Az új anyagkutatói irányok – mint a CFR PEEK-alapú, nagy szilárdságú szubperiosteális rendszerek – szintén egyre nagyobb érdeklődést kapnak. Etik és Yalcin háromdimenziós FEA-modellezéssel vizsgálták a különböző implantátumvastagságokat és csavarátmérőket, és azt találták, hogy a vastagabb (1,5 mm-es) implantátum csökkenti a csontban fellépő feszültségeket, ám egyúttal növeli az implantátum és a fémszerkezet terhelését. A nagyobb (2,0 mm-es) csavarátmérő szintén csökkentette a csontterhelést, viszont növelte a fémszerkezeti komponensek feszültségét, ami arra utal, hogy az implantátumgeometria és az anyagtulajdonságok gondos egyensúlyozása szükséges a megfelelő biomechanikai teljesítményhez [2].

A szubperiosteális implantátumok mechanikai vizsgálatai nem kizárólag virtuális elemzésekre épülnek; Kulcsár és Zsoldos 2024-es munkája egy olyan fizikai teszterendezést is ismertet, amely komplex képet ad az implantátum-abutment rendszer viselkedéséről. Kutatásunk során ezen rendszer továbbfejlesztett változatát alkalmaztuk. A kísérleti és numerikus vizsgálatok együttes alkalmazása különösen értékes, mivel lehetővé teszi a numerikus modellek validálását, amely kulcsfontosságú a klinikai alkalmazhatóság szempontjából [3].

Egy egészséges mandibuláris (alsó állkapocs-csont)hoz rögzített) és maxilláris (felső állkapocs-csont)hoz rögzített) csontállománnyal rendelkező páciens esetében a sérült vagy teljesen hiányzó fogak pótlása napjainkban már nem jelent komoly kihívást. A modern orvostudomány fejlődésének köszönhetően azonban azoknál a pácienseknél is lehetőség nyílik a rágóképesség helyreállítására, akik baleset vagy betegség következtében jelentős csontvesztést szenvedtek el, és akiknél az endoszteális implantátumok alkalmazása nem megvalósítható. Ilyen esetekben alternatív megoldást jelentenek az úgynevezett szubperiosteális implantátumok, amelyek az endoszteális implantátumokkal ellentétben nem az állcsont belsejébe, hanem annak felszínére, a csontthártya alá kerülnek beültetésre.

A beültetést követően – sikeres műtét esetén – a szervezetben megindul az osseointegrációs folyamat, amely során a csontszövet fokozatosan

körülveszi és stabilizálja a titánimplantátumot, biztosítva ezzel annak hosszú távú mechanikai és biológiai rögzülését.

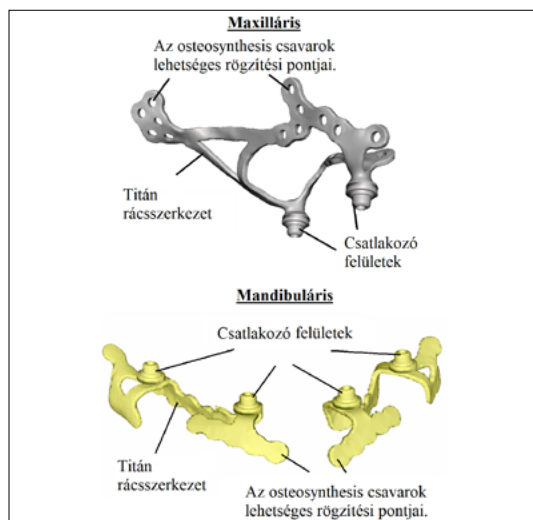
Kutatásunk során ezen szubperiosteális implantátumok mechanikai viselkedését vizsgáljuk különböző terhelési esetek mellett, azzal a céllal, hogy a tervezők számára olyan irányelveket fogalmazunk meg, amelyek elősegítik a gyorsabb és megbízhatóbb implantátumok fejlesztését és előállítását. Ezen túlmenően, mivel az endoszteális implantátumokra már létezik az ISO 14801 szabvány – amely a fogászati implantátumok dinamikus fárasztóvizsgálatának módszerét és feltételeit határozza meg –, a szubperiosteális implantátumok esetében azonban ilyen egységes irányelv jelenleg nem áll rendelkezésre, célunk egy szabványosított vizsgálati módszer és teszterendezés kialakítása is. Ez hozzájárulhat ezen implantátumok klinikai alkalmazásának megbízhatóságához és összehasonlíthatóságához.

Ezen implantátumokat CBCT-felvételek alapján 3D-s tervezőszoftverekkel, pl. exocad tervezik a fogtechnikusok és a fogorvosok, minden egyes implantátum teljesen egyedi eset és egyénspecifikus [4].

Az 1. ábrán egy maxilláris és egy mandibuláris szubperiosteális implantátum 3D-s, CAD-alapú geometriai modellje látható, a fontosabb részek megjelölésével.

A tervezés után a tényleges gyártás a következő lépésekből áll:

- modell előkészítése porágyolvasztásos additív gyártásra,



1. ábra. Maxilláris és mandibuláris szubperiosteális implantátumok főbb részei [5]

- implantátum gyártása lézeres porágyolvaszással (LPBF),
- feszültségmentesítő hőkezelés,
- alumínium-oxid (Al_2O_3) szemcseszórás,
- csatlakozó felületek utómunkálása marógépen,
- 3D-nyomtatáshoz használt alátámasztások eltávolítása,
- kézi utómunkálatok,
- ultrahangos tisztítás [6].

Kutatásunk során az ilyen módon előállított egyedi szubperiosteális implantátumok vizsgálatával foglalkozunk. Egy korábbi publikációnk kapcsán felmerült a bíráló részéről, hogy az általunk alkalmazott befogási rendszer (különösen a nyomtatott befogótest és a ragasztott kapcsolat) képes-e elviselni az alkalmazott terheléseket, vagy esetleg ezek károsodnak először, ezáltal torzítva a vizsgálati eredményeket. Ez a felvetés abból adódik, hogy a befogáshoz használt anyagok mechanikai tulajdonságai jelentősen elmaradnak a titánimplantátumokétól.

Tézisünk szerint azonban a befogórendszer a klinikailag releváns harapási erőtartományban megfelelően viselkedik, és tönkremenetel nélkül képes modellezni az állkapocscsont mechanikai szerepét.

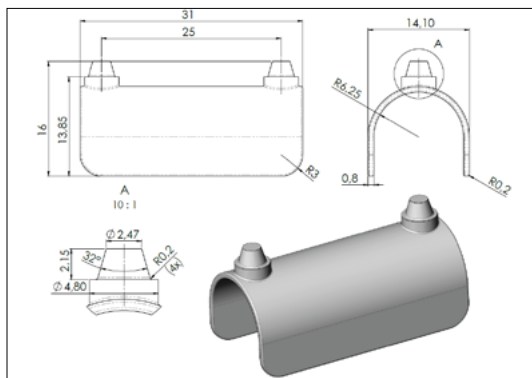
2. Anyagok és módszerek

2.1. Idealizált modell és a mintabefogás

Mivel a szubperiosteális implantátumok minden esetben egyénre szabottak, különböző implantátumok közvetlen összehasonlítása nem minden esetben kivitelezhető. Ennek kiküszöbölésére a belső, additív gyártással kialakított struktúrák vizsgálatához egy idealizált modellt hoztunk létre. A modell kialakítása során a Dent-Art Technik Kft. (Győr, Magyarország) fogtechnikusainak, valamint fogorvosok és szájsebészek szakmai tapasztalataira támaszkodtunk. Az így meghatározott geometriai és tervezési szempontok alapján készült el a 2. ábrán bemutatott idealizált modell. A modell alkalmazásának célja a vizsgálatok reprodukálhatóságának növelése és az eredmények megbízható összehasonlíthatóságának biztosítása volt.

Az elkészített implantátumok vizsgálatát a korábban kifejlesztett tesztpadon végeztük, amely pneumatikus munkahengerek és forgómozgás segítségével képes a harapás és rágás folyamatának imitálására [4].

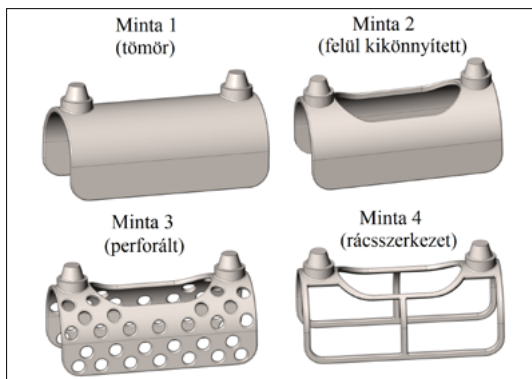
A vizsgálatok elvégzéséhez szükség volt a 3. ábrán bemutatott befogási minta kialakítására; a



2. ábra. Idealizált szubperiosteális implantátum 3D-tervezett modellje és műszaki rajza [5]



3. ábra. Vizsgálati minta a teszt előtt



4. ábra. Vizsgált minták CAD-modellje

továbbiakban „minta” alatt a befogóra rögzített implantátumot értjük. Az ábrán jól látható a befogáshoz alkalmazott elem, valamint a ragasztási réteg elhelyezkedése is.

Jelen vizsgálataink során négy eltérő belső struktúrával rendelkező mintát elemeztünk, a teljesen tömör kialakítástól a jelentősen könnyített, hálószerű szerkezetiig. A vizsgálati minták CAD-modellje a 4. ábrán látható.

2.2. Felhasznált anyagok és anyagmodellek

A vizsgálati minták Tough 2000 Resin V1 alapanyagból készült mandibula modellbe kerültek rögzítésre (Formlabs, Somerville, MA, USA). Az implantátumokat a mandibula modellhez két-komponensű Pattex Repair Universal epoxi ragasztóval rögzítettük (Henkel AG & Co. KGaA, Düsseldorf, Németország). A kikeményedést követően a ragasztó szakítószilárdsága megközelítőleg 130 kgf/cm^2 ($\approx 13 \text{ MPa}$) volt 24°C -on, amelyet a csont és az implantátum közötti osseointegráció által biztosított mechanikai kapcsolat közelítésére választottunk [7].

Az alkalmazott anyagok főbb mechanikai tulajdonságait az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat. Anyagtulajdonságok a [8, 9, 10, 11] alapján

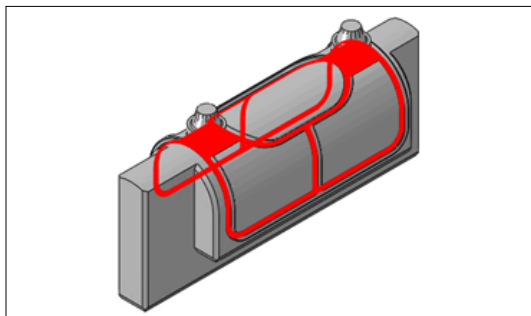
Anyagtulajdonságok		
Tulajdonság	Tough 2000	Ti6Al4V
Young-modulus	1,2 GPa	113 GPa
Poisson-tényező	0,35	0,342
Folyáshatár	Nem modellezett	790 MPa
Szakítószilárdság	Nem modellezett	860 MPa
Szakadási nyúlás	Nem modellezett	15 %

2.3. Végelem-vizsgálat (FEA)

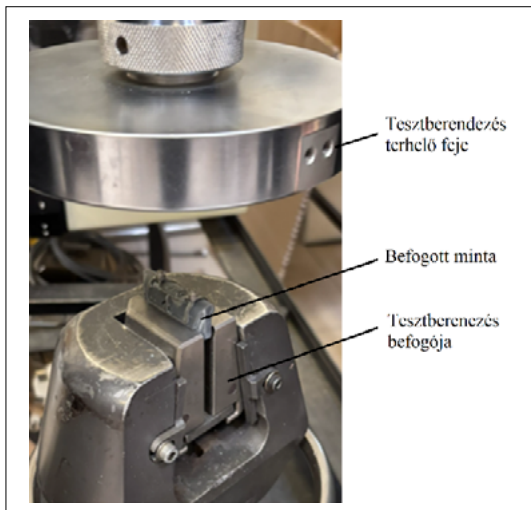
A publikációk száma is bizonyítja, hogy a szimulációs eljárások a szájban történő folyamatok leképezésére és az implantátumok tervezésére is jól használhatóak. A cikkben tárgyalt vizsgálat végelem-analíziséhez egy nemlineáris, statikus végelem-modell épült fel Abaqus Standard szoftverkörnyezetben. Az implantátum titán anyagát bilineáris elasztó-plasztikus anyaggal, a mandibulát pedig lineáris elasztikus anyaggal modelleztük. Az elemek közötti kapcsolatot kohéziós kontaktként képeztük le normál irányban $15\,000 \text{ N/mm}$, míg tangenciális irányba 5500 N/mm merevséggel, amely értékek a Pattex Repair Universalra jellemzőek. A ragasztás károsodása a hiányzó anyagtulajdonságok miatt nem képezte a virtuális vizsgálat tárgyát. A modell felépítése az 5. ábrán látható.

A terhelő erő az implantátum rögzítő felületén került egyenletesen megoszló erőrendszerként modellezésre. Kimenetként az elmozdulást a feszültségmezőt és az akumulált ekvivalens plasztikus nyúlást értékeltük ki a terhelési ciklus vagy ciklusok után.

A végelem-háló minden esetben másodrendű tetraéderelemekből állt. A csomópont- és elem-



5. ábra. Minta 4 végelem-modellje a kohéziós kontakttal kiemelésével



6. ábra. Új tesztbeállítás

számok az alábbiak szerint alakultak: V1: 125 739 csomópont és 74 496 elem; V2: 222 534 csomópont és 138 465 elem; V3: 182 535 csomópont és 108 671 elem; V4: 200 912 csomópont és 120 909 elem.

2.4. Mechanikai terhelési vizsgálatok

A vizsgálatok során három különböző terhelési tesztet alkalmaztunk eltérő erőszintek mellett. Az első két vizsgálatot korábbi kutatásaink során végeztük el, amelyek részletes bemutatása az előző publikációnkban található [5].

A jelen munkában bevezetett harmadik, extrém terhelési teszt során a szükséges nagy terhelőerőt saját tesztpadunkkal már nem tudtuk biztosítani, ezért a Széchenyi István Egyetem INSTRON 5582 univerzális szakítógépét alkalmaztuk. A vizsgálati elrendezés a 6. ábrán látható.

Minden egyes teszt előtt és után CT-felvételeket készítettünk a mintákról, amelyeket összehasonlítva, a titánimplantátumon kialakuló maradó

alakváltozások jeleit vizsgáltuk. A CT-felvételek a Széchenyi István Egyetemen (Győr, Magyarország) Yxlon Modular CT rendszerrel készültek (YXLON International GmbH, Hamburg, Németország).

A kapott CT-adatállományok kiértékelése és az egyes állapotok közötti összehasonlítás Volume Graphics StudioMax szoftverrel történt (Volume Graphics GmbH, Heidelberg, Németország), amely lehetővé tette a deformációk pontos vizualizálását és kvantitatív elemzését.

Az első tesztet a korábban létrehozott tesztpadon végeztük, amely során 500 harapási ciklust alkalmaztunk, megközelítőleg 326 N összerheléssel és 2 s/ciklus terhelési idővel, ezzel egy átlagos rágási folyamatot modellezve. A második teszt szintén a tesztpadon történt, azonban itt már egyetlen harapást alkalmaztunk hidraulikus rásegítéssel, ahol minden egyes mintára 2000 N terhelést adtunk 10 s időtartam alatt. A harmadik, extrém terhelési vizsgálat során minden egyes mintát különböző, a végeelem-modell alapján már maradó alakváltozást előidéző erőkkel terhelünk, 1 s terhelési idő mellett.

A különböző vizsgálatok főbb paramétereit a 2. táblázatban foglaltuk össze. A harmadik vizsgálatnál, a végeelem-modellből származó terhe-

lőrök nagysága pedig a 3. táblázatban láthatók.

3. Eredmények

3.1. Szimulációs eredmények

A végeelem-számítás alkalmas a kritikus keresztmetszetek, erősen terhelt helyek és a maradó alakváltozás meghatározására. A 7. ábrán a feszültségmező látható a különböző struktúrák esetén, a 3. táblázat szerinti harapási erőket alkalmazva:

Látható, hogy a kritikus helyek az implantátum tövénél keletkeznek. Fontos megemlíteni, hogy az egyenértékű feszültség nem tesz különbséget a terhelés nyomó vagy húzó mivolta közt. Jelen esetben a feszültség nyomó jellegű, amely kedvezőbb a károsodásra nézve.

A 8. ábrán az akkumulált plasztikus nyúlást látjuk egyszeri terhelés esetén.

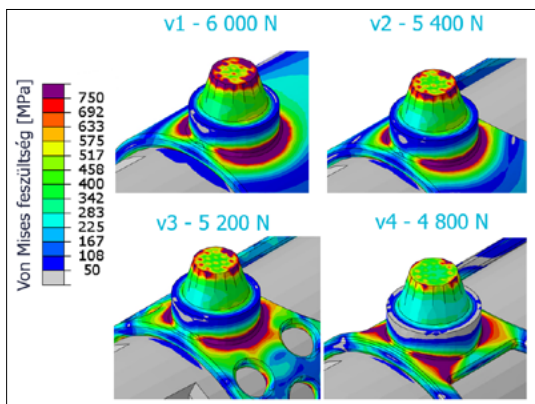
A szimulációs eredmények alapján az implantátumban lévő könnyítések csökkentik a maradó alakváltozás kialakulásához szükséges harapási erőt. Megjegyzendő, hogy a plasztikus deformáció kialakulásához olyan jelentős erő szükséges, amely harapással nem életszerű. Emellett a képlékeny anyagi viselkedés kizárólag lokálisan jelentkezik még ezen jelentős erő hatására is.

2. táblázat. Vizsgálati paraméterek

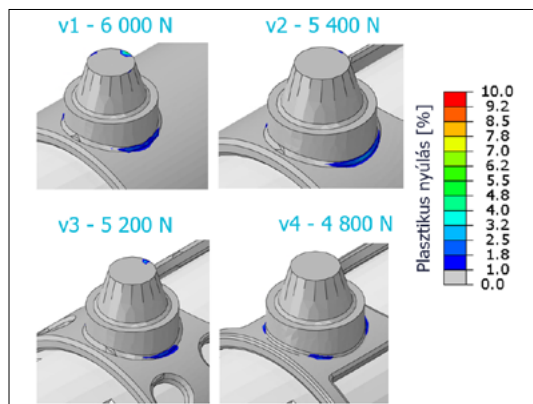
Vizsgálati paraméterek			
No.	Harapások száma (db)	Harapás ereje (N)	Harapás ideje (s)
1	500	326	2
2	1	2000	10
3	1	változó	1

3. táblázat. Harapási erők a harmadik vizsgálatnál

Vizsgálati paraméterek	
Minta	Harapás ereje (N)
1	6000
2	5400
3	5200
4	4800



7. ábra. Feszültegeloszlás



8. ábra. Maradó alakváltozás

3.2. Mechanikai és CT-vizsgálatok eredményei

A vizsgált darabokról az egyes vizsgálatok előtt és után készült CBCT-felvételek összehasonlító eredményei a 9–11. ábrákon láthatók. A 9. ábra az első vizsgálat, a 10. ábra a második vizsgálat eredményeit mutatja, amelyek még az előző tanulmány részét képezték. A 11. ábra a jelen munkában bevezetett harmadik, extrém terhelési vizsgálat eredményeit szemlélteti.

Fontos megjegyezni, hogy az egyes állapotokat mindig az azt megelőző állapothoz viszonyított-

tuk; így például a harmadik teszt utáni állapotot a második teszt utáni állapottal hasonlítottuk össze, nem pedig a kiindulási geometriával.

4. Eredmények értékelése

A kísérleti vizsgálatok során alkalmazott teszterendezés sajátosságai miatt a valós terhelési esetekben csak olyan terhelési konfiguráció volt megvalósítható, ahol a terhelés az implantátum csatlakozó kúpjának tengelyével párhuzamosan hat. A végeelem-vizsgálatok alapján a kritikus terhelési értékek vertikális irányban 4100 és 6000 N között, míg 30°-os terhelési irány esetén 2000 és 3200 N tartományban alakulnak. A 30°-os terhelési eset alkalmazása az endoszteális implantátumok vizsgálatánál is bevett módszer, így ennek figyelembevétele a szubperiosteális implantátumok esetében is indokolt lehet [12].

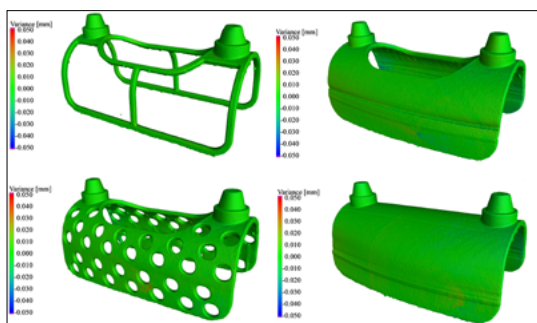
A kísérleti és numerikus eredmények összevetése alapján megállapítható, hogy az implantátumok csak extrém terhelési viszonyok mellett mutatnak károsodást. A vizsgált minták mindegyike alkalmas lehet klinikai alkalmazásra, mivel a belső kitöltési struktúra nem befolyásolja jelentősen az elviselt maximális terhelést.

Az elemzések rámutattak arra, hogy a kritikus keresztmetszet minden esetben a hálószerkezet és a csatlakozó csomópontok találkozási zónájában alakul ki, amely a terhelésátadás szempontjából meghatározó jelentőségű.

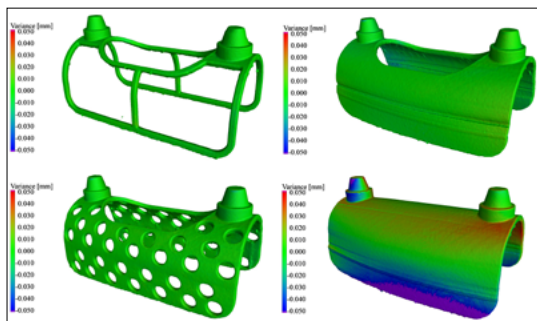
A CT-alapú vizsgálatok eredményei tovább pontosították a mechanikai viselkedés értelmezését. Az első tesztet követően egyik vizsgált mintán sem volt kimutatható változás. A második teszt után a 4-es mintánál a ragasztott kapcsolat folytonossága megszakadt, amely lehetővé tette a titánszerkezet deformációját. A harmadik, extrém terhelési vizsgálat során ez a jelenség szinte minden mintánál bekövetkezett, kivéve az 1-es darabot, amely változatlan maradt.

Fontos megállapítás, hogy a kísérleti rendszerben nem az implantátum szerkezete, hanem a ragasztott kapcsolat bizonyult gyenge láncszemnek. A Tough 2000 alapanyagból készült befogótest és a ragasztott kapcsolat csak jelentősen megnövelt, klinikailag nem releváns túlterhelés esetén károsodott.

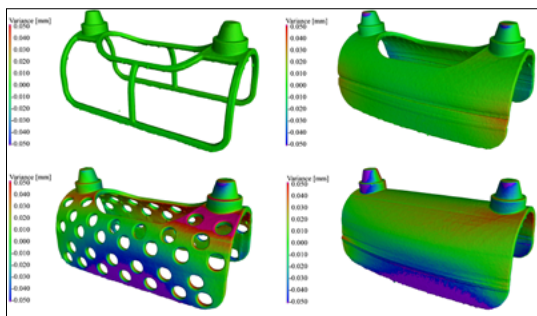
Összességében elmondható, hogy a vizsgált szubperiosteális implantátumok mechanikai szempontból biztonságosan alkalmazhatók a klinikailag releváns terhelési tartományban, és a bemutatott módszertan alkalmas a különböző szerkezeti kialakítások összehasonlító értékelésére.



9. ábra. CT-felvételek összehasonlító vizsgálatainak eredménye az első teszt után



10. ábra. CT-felvételek összehasonlító vizsgálatainak eredménye a második teszt után



11. ábra. CT-felvételek összehasonlító vizsgálatainak eredménye a harmadik teszt után

5. Következtetések

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a szubperiosteális implantátumok mechanikai viselkedése megfelelő a klinikailag releváns terhelési tartományban, és károsodás csak extrém terhelési esetekben következik be. A különböző belső struktúrák nem befolyásolták jelentősen az elviselt maximális terhelést, így mindegyik vizsgált kialakítás alkalmas lehet klinikai alkalmazásra.

A kritikus keresztmetszet minden esetben a hálószerkezet és a csatlakozócsonkok találkozási zónájában alakult ki. A kísérleti eredmények alapján a rendszer gyenge pontja nem az implantátum szerkezete, hanem a ragasztott kapcsolat volt, amely csak klinikailag nem releváns, extrém túlterhelés esetén károsodott.

Összességében a bemutatott módszertan alkalmas a különböző implantátumkialakítások összehasonlító vizsgálatára, és hozzájárulhat a szubperiosteális implantátumok megbízhatóbb tervezéséhez.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk megköszönni a Széchenyi István Egyetemen keresztül megvalósuló Pannónia Ösztöndíj Program támogatását, amely lehetővé tette az FMTÜ konferencián való részvételt, ezáltal hozzájárulva a kutatás bemutatásához és megjelenéséhez. Köszönettel tartozunk továbbá a Dent-Art Technik Kft.-nek az implantátumok biztosításáért és a szakmai együttműködésért. Külön köszönet illeti a Virtualitica Kft.-t a végeelem-vizsgálatokhoz nyújtott támogatásért, valamint az Abaqus szoftver biztosításáért.

Köszönetünket fejezzük ki a Kulturális és Innovációs Minisztériumnak és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapnak az Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program (EKÖP-KDP) keretében nyújtott támogatásért, amelyben Vörös Ádám részesült.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Pellegrino G., Karaban M., Scalchi V., Urbani M., Giudice A., Barausse C., Felice P.: *Finite Element Analysis of Functionally Loaded Subperiosteal Implants Evaluated on a Realistic Model Reproducing Severe Atrophic Jaws*. Methods Protoc., 8/1. (2025). 8.
<https://doi.org/10.3390/mps8010008>
- [2] Etik E., Yalcin B. K.: *Biomechanical Impact of Implant Thickness and Screw Diameter on Patient-Specific CFR-PEEK Subperiosteal Implants: A Three-Dimensional Finite Element Analysis*. 2026.
- [3] Kulcsar K., Zsoldos I.: *Mechanical Studies of Subperiosteal Implants*. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 68. (2024) 53–62.
<https://doi.org/10.3311/PPme.23706>
- [4] Heller M. O.: Chapter 32 - *Finite element analysis in orthopedic biomechanics*. In: Human Orthopaedic Biomechanics (szerk. Innocenti B. and Galbusera F.). Academic Press, Southampton, 2022. 637–658.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824481-4.00026-3>
- [5] Vörös Á., Lőrincz B., Kónya J., Zsoldos I.: *Effect of Internal Structural Design on Stress Distribution in 3D-Printed Sub-periosteal Implants Under Mechanical Loading*. Bioengineering, 13. (2026) 368.
<https://doi.org/10.3390/bioengineering13030368>
- [6] Kónya J., Kulcsár K.: *Virtuális tervezés és 3D-s gyártás a fogászati szakterületen* (Virtual Design and 3D Manufacturing in Dental Applications). 2017.
- [7] Henkel Magyarország Kft. Pattex Repair Universal – Two-Component Epoxy Adhesive: Technical Data Sheet. 2025.
- [8] Suresh S.: *Fatigue of Materials*. Cambridge University Press, 1998. ISBN 9780521570466.
- [9] Form Cure V1 Time and Temperature Settings Available online: <https://s3.amazonaws.com/servicecloudassets.formlabs.com/media/Finishing/Post-Curing/115001414464-Form%20Cure%20Time%20and%20Temperature%20Settings/FormCurePost-CureSettings.pdf> (letöltve: 2026. március 15).
- [10] Murr L. E., Gaytan S. M., Ramirez D. A., Martinez E., Hernandez J., Amato K. N., Shindo P. W., Medina F. R., Wicker R. B.: *Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies*. Journal of Materials Science & Technology, 28. (2012) 28. 1–14.
[https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60016-4](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60016-4)
- [11] Geetha M., Singh A. K., Asokamani R., Gogia A. K.: *Ti Based Biomaterials, the Ultimate Choice for Orthopaedic Implants – A Review*. Progress in Materials Science, 54. (2009) 54. 397–425.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.06.004>
- [12] International Organization for Standardization ISO 14801:2016 Dentistry – Implants – Dynamic Fatigue Test for Endosseous Dental Implants.
<https://www.iso.org/standard/61997.html> (letöltve: 2026. március 20.)