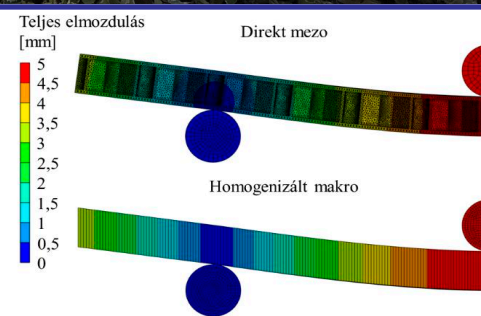
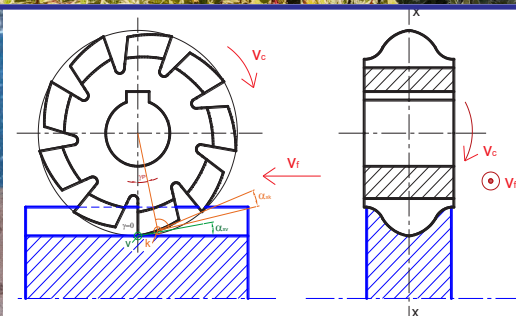
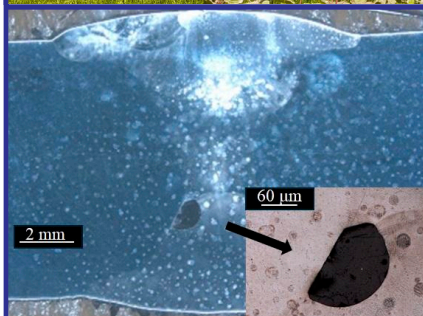


GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA



DEBRECENI
EGYETEM



A DEBRECENI EGYETEM MŰSZAKI KAR
GÉPÉSZMÉRNÖKI TANSZÉKÉNEK KÜLÖNSZÁMA

2026/2.

92 oldal
LXXVII. évfolyam



Debreceni Egyetem

Műszaki Kar
Gépezsmérnöki
Tanszék

IPARI SZOLGÁLTATÁSOK



**Komplex mérési feladatok – egyszerűbb,
gyorsabb és hatékonyabb megoldással.**

TÖBB SZAKTERÜLET. EGY HELYEN. PRECÍZEN.

A Debreceni Egyetem Műszaki Karán olyan komplex ipari méréseket és vizsgálatokat végzünk, amelyek ellátásához máshol gyakran több különböző tanszék vagy szakmai terület együttműködésére van szükség.

Nálunk a szükséges tudományterületek és szakmai kompetenciák egy kézben összpontosulnak, így a megbízásokat gyorsan, rugalmasan és hatékonyan tudjuk kezelni.



rövid átfutási idő



rugalmas ügyintézés



precíz, megbízható mérések



korrekt, versenyképes árak

A FŐ TEVÉKENYSÉGEK



Roncsolásos és
roncsolásmentes vizsgálatok



Környezetszimulációs tesztek



Gyártástechnológiai
szolgáltatások (CNC, AM)



Gépipari mérések



Diagnosztika



Mérnöki tanácsadás

- **5** év tapasztalat
- közel **150** elvégzett ipari megbízás
- több mint **30** elégedett partner
- **10** korszerűen felszerelt laboratórium

KAPCSOLAT

✉ **Dr. Mankovits Tamás** | gepezslab@eng.unideb.hu,

✉ gepezsmernok@eng.unideb.hu 🌐 mecheng.unideb.hu 📘 fb.com/gepezsmernokitanszek

📍 4028 Debrecen, Ótetető u. 2-4. III. emelet 📞 +36 52 415 155 / 77776

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET műszaki, vállalkozási, befektetési,
értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

Elnök:

Vadászné

Dr. Bognár Gabriella

Főszerkesztő:

Dr. Dömötör Csaba

Főszerkesztő-helyettes:

Vesza József

Szerkesztőbizottság:

Dr. Ábrahám György

Dr. Barkóczy István

Dr. Borbás Lajos

Dr. Czifra Árpád

Dr. Danyi József

Dr. Fekete Gusztáv

Dr. Horák Péter

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Dr. Jánosi Endre

Dr. Jármay Károly

Dr. Kakuk József

Dr. Kalácska Gábor

Dr. Lelkes Márk

Dr. Kanócz János

Dr. Könözy László

Dr. Mankovits Tamás

Dr. Máté Márton

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Patkó Gyula

Dr. Piros Attila

Dr. Soltész László

Dr. Szabó István

Dr. Szávai Szabolcs

Dr. Száva János

Dr. Szigeti Ferenc

Dr. Tímár Imre

Dr. Weltsch Zoltán

TISZTELT KOLLÉGÁK!

Örömmel köszöntöm Önöket a GÉP folyóirat jelen különszámában, amelyben a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszéke tizenkét szakcikkkel mutatja be oktatási és kutatási tevékenységének meghatározó területeit. A tanulmányok az anyagtudomány, a gyártástudomány, a mechanika, a géptervezés és a mérnöki szimuláció kérdéseit öleli fel, így a gépészmérnöki terület széles spektrumát képviselik. Célunk, hogy ezzel az összeállítással átfogó képet adjunk kutatási irányainkról, az ipari együttműködések során szerzett tapasztalatainkról, valamint az oktatásban és kutatásban alkalmazott innovatív megközelítéseinkről.

Külön öröm és büszkeség számunkra, hogy e különszám önálló keretet biztosít a tanszék eredményeinek bemutatására; így ezt a lehetőséget az elmúlt évek következetes szakmai munkája iránti bizalom jeleként értékeljük. Különösen fontosnak tartjuk, hogy a hazai gépészmérnöki felsőoktatás és kutatás meghatározó műhelyei között a mi közösségünk munkája is láthatóvá válik.

Ez a lapszám továbbá alkalmat ad arra is, hogy köszönetet mondjunk minden közreműködőnek – oktatóinknak, kutatóinknak, hallgatóinknak és ipari partnereinknek –, hiszen az itt bemutatott eredmények mögött szoros együttműködés áll.

Bízunk benne, hogy válogatásunk nemcsak tájékoztat, hanem gondolatokat ébreszt, szakmai párbeszédre ösztönöz, és újabb együttműködésekhez vezet.

A tanszékünk minden évben megszervezi az International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering szakmai konferenciát, amely az elmúlt években a legnépszerűbb gépészeti rendezvénynek nőtte ki magát hazánkban. Büszkéek vagyunk továbbá szakmérnöki képzéseinkre (Gépészeti szimulációs; Műszaki diagnosztikai; Polimertechnológiai; Szerkezetintegritási és roncsolásmentes vizsgáló) is. A képzéseinken számos ipari szakember vesz részt évről évre. Ipari szolgáltatásaink is egyre népszerűbbek az anyagvizsgálat és a gyártástechnológia területén.

Továbbra is nyitottak vagyunk minden olyan szakmai kapcsolatra, amely hozzájárul a terület fejlődéséhez, és az egyetemi-ipari együttműködés erősítéséhez.

Köszönöm megtisztelő figyelmüket, és hasznos olvasást kívánok!

Dr. Mankovits Tamás

tanszékvezető egyetemi docens

Gépészmérnöki Tanszék

Debreceni Egyetem Műszaki Kar

A szerkesztésért felelős: Dr. Dömötör Csaba • A szerkesztőség címe: 3515 Miskolc, Egyetemváros

Telefon: +36-46/565-111 (12-90) • e-mail: mail@gepujsag.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: +36-1/202-0656, fax: +36-1/202-0252, e-mail: mail@gteportal.eu, internet: www.gteportal.eu

A GÉP folyóirat internetcíme: <http://www.gepujsag.hu> • Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Bárdos Krisztina ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Telefon: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Zrt. • Postacím: 1900 Budapest

Előfizetésben megrendelhető az ország bármely postáján, a hírlapot kézbesítőknél, www.posta.hu WEBSHOP-ban

<https://www.posta.hu/ugyfelszolgalat/webform/hirlap>, e-mailen a hirlapelofizetes@posta.hu címen, telefonon +36-1-767-8262 számon, levélben a MP Zrt. 1900 Budapest címen. Külföldön terjeszti a Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14.

T: +36 1 201 88 91, +36 1 212 53 03, E-mail: batthyany@kultur-press.hu

Egy szám ára: 1260 Ft. Dupla szám ára: 2520 Ft.

INDEX: 25 343 • ISSN 0016-8572 (Nyomtatott) • ISSN 3057-9473 (Online)

A megjelent cikkek lektoráltak.

A kiadvány a Nemzeti Kulturális Alap támogatásával jelenik meg.

TARTALOM

1. Dr. Gyöngyösi Szilvia, Dr. Czégéni Csilla Enikő: ANYAGVIZSGÁLÓ LABORATÓRIUM FÓKUSZTERÜLETEI A DEBRECENI EGYETEM GÉPÉSZMÉRNÖKI TANSZÉKÉN	5	7. File Máté, Kállai Imre, Dr. Huri Dávid, Dr. Mankovits Tamás: POLIMER SZENDVICSSZERKEZETEK MEZOMODELLEZÉSE	49
2. Dr. Bodzás Sándor, Dr. Szanyi Györgyi: A TÁRCSAMARÓK GEOMETRIAI ÉS ÉLEZÉSI JELLEMZŐINEK VIZSGÁLATA A VEZÉRTÁRCSA ÉS A HÁTRAMUNKÁLÁSI GÖRBÉK ALAPJÁN	13	8. Varga Tamás Antal, Dr. Fazekas Bálint, Dr. Mankovits Tamás: INTEGRÁLT ADATKEZELŐ ÉS ANYAGMODELL-ILLESZTŐ RENDSZER GUMIK MECHANIKAI VIZSGÁLATÁHOZ	53
3. Garay Richárd, Nemes Dániel: FDM NYOMTATÁS GEOMETRIAI PONTOSSÁGA - A CAD MODELLTŐL A VALÓSÁGIG	21	9. Ruzicska Gábor, Dr. Czégé Levente, Dr. Mankovits Tamás: HELYETTESÍTŐ MODELL ALAPÚ OPTIMALIZÁLÁS TERMELÉSI RENDSZEREK FEJLESZTÉSÉRE	58
4. Técsi Máté, Nemes Dániel: EFFEKTÍV MECHANIKAI JELLEMZŐK MEGHATÁROZÁSA RÖGZÍTETT PARAMÉTEREKSEL NYOMTATOTT FDM STRUKTÚRÁKHOZ	27	10. Nemes Dániel: MODELLEZÉSI MÓDSZEREK A GÉPÉSZETBEN	65
5. Garay Richárd, Dr. Manó Sándor, Dr. Mankovits Tamás: CELLULÁRIS Ti6AL4V CSONTRÖGZÍTŐ LEMEZEK FÁRADÁSI ÉLETTARTAMÁNAK MEGHATÁROZÁSA KÍSÉRLETI ÉS NUMERIKUS MÓDSZEREKKEL	33	11. Csajbók Imola Lenke, Nemes Dániel: TOYOTA AVENSIS JÁRMŰPARAMÉTEREK MÉRÉSE JÁRMŰDINAMIKAI MODELL VALIDÁLÁSÁHOZ	72
6. Dr. Czégéni Csilla Enikő, Hódos György: ELEKTROMOS FRÖCCSÖNTŐGÉP ALKALMAZÁSA A MÉRNÖKI POLIMERTECHNOLÓGIAI ALAPISMERETEK EGYETEMI OKTATÁSÁBAN	43	12. Dr. Bodzás Sándor: AZ ESZTERGA SZERSZÁMGÉPEK FEJLŐDÉSE: A KÉZI HAJTÁSTÓL A CNC TECHNOLÓGIÁIG	77

ANYAGVIZSGÁLÓ LABORATÓRIUM FÓKUSZTERÜLETEI A DEBRECENI EGYETEM GÉPÉSZMÉRNÖKI TANSZÉKÉN

FOCUS AREAS OF THE MATERIALS TESTING LABORATORY AT THE DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING OF THE UD

Dr. Gyöngyösi Szilvia^{}, Dr. Czégéni Csilla Enikő^{**}*

ABSTRACT

In this study, we present the Materials Testing Laboratory of the Department of Mechanical Engineering at the University of Debrecen and the main scope of activities outlining the key points of the examinations.

Previously materials testing play a significant role in the life of the Department, both in education and research. In recent years, Debrecen has become as one of the most dynamically developing industrial centre, resulting in the continuous expansion of major companies. At the same time, industrial requests for material testing have increased significantly towards our Department.

In education, it is important to provide Students with the opportunity to obtain theoretical knowledge and to acquire practical materials testing procedures at a high level. An integral part of this is the presence of modern well-equipped Laboratories, where various testing instruments are available for practical training.

In addition, the presence of industry and education, scientific research activities necessitated the establishment of a Materials Testing Laboratory, which allows these areas to operate independently of each other.

Materials testing itself covers an extremely broad field, therefore we highlight only a few main profiles of the Department of Mechanical Engineering Materials Testing Laboratory through some selected case studies.

1. BEVEZETÉS

Az ipari gyakorlatban alkalmazott anyagok tulajdonságainak ismerete, így az anyagvizsgálati alapok és eljárások, mint tudás megszerzése kiemelkedő fontossággal bír a mérnöki gyakorlatban. Az anyagok ismeretének, vizsgálatának elsajátításához elengedhetetlen a magas szintű elméleti és gyakorlati oktatás. A Debreceni Egyetem Gépészmérnöki Tanszékén a Hallgatók különböző tárgyak keretében ismerkedhetnek meg a fémes – és nemfémes anyagokkal kapcsolatos

anyagismerettel, az anyagok vizsgálatára, feldolgozására, tervezésére vonatkozó módszerekkel. A gépészmérnöki alapképzés lehetőséget biztosít Anyagtechnológia specializáció választására, mely szakirány célzottan erre a területre fókuszál (1. ábra).

Az ipari jelenlét ugrásszerű növekedésével jelentősen megnövekedtek az anyagvizsgálattal kapcsolatos problémák megoldására irányuló megkeresések, az anyagvizsgálattal összefüggő fejlesztések, illetve mérések elvégzésére vonatkozó felkérések.

Az oktatási és ipari oldal mellett számos kutatási tevékenységünk szerves része az anyagvizsgálat.

A Gépészmérnöki Tanszék több, korszerű berendezésekkel felszerelt laboratóriuma biztosítja az oktatási tevékenység, a kutatási feladatok és mérések magasszintű elvégzését (2. ábra).

Az anyagvizsgálat területén ugrásszerűen megnövekedett vizsgálati igény tette szükségessé egy új Anyagvizsgáló Laboratórium kiépítését, mellyel biztosítottuk, hogy az oktatással párhuzamosan futó mérések, kutatások akadálytalanul működjenek. Ugyanakkor a Laboratórium szerves része marad az oktatásnak, hiszen a Hallgatók kutatásba, vizsgálati mérésekbe bekapcsolódva tovább növelik az anyagvizsgálathoz kapcsolódó gyakorlati tudásukat. 2026. január 1-től az oktatást, kutatást és ipart támogató új, kalibrált berendezésekkel és eszközökkel felszerelt laboratóriumban az EN 17025 szabvány ajánlásai alapján működő Minőségirányítási rendszert vezettünk be.

2. ANYAGVIZSGÁLAT SZEREPE A GÉPÉSZMÉRNÖKI TANSZÉK MŰKÖDÉSÉBEN

2.1. Anyagvizsgálat az oktatásban

Az anyagvizsgálat az esetek nagy részében komplex feladat. Elengedhetetlen hozzá az anyagok, mérési módszerek, eljárások pontos ismerete és az anyagvizsgálathoz tartozó mérőberendezések, eszközök készségszintű használata. Fontos, hogy a Hallgatók - leendő mérnökök - a tanulmányaik során hiánytalanul elsajátítsák az anyagvizsgálati problémák, feladatok

^{*} egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

^{**} egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

megoldásához vezető utat. Az oktatás során nagy hangsúlyt kell fektetni arra, hogy megtanulják azt a fajta mérnöki szemléletet - gondolkodásmódot, amely alkalmassá teszi őket az ilyen célú feladatok elvégzésére. Ehhez elengedhetetlen az is, hogy a Hallgatók a tanórák keretében maguk végezzék el a méréseket. Az oktatás mellett biztosítani kell, hogy mind a kutatási tevékenységgel kapcsolatos, mind az ipari problémák megoldására irányuló mérések akadálytalanul működjenek. Ehhez a korábbi mérési kapacitást mind a humán erőforrást, mind a laboratóriumok felszerelését meg kellett növelni, hogy maradéktalanul teljesíteni tudjuk a magas szintű gyakorlati oktatást, illetve a különböző, iparban előforduló problémákhoz, kutatásokhoz kapcsolódó vizsgálatokat is el tudjuk végezni.

Az említett két vonalat (oktatás – ipari mérések) “összekapcsoltuk” és amennyiben a feladat engedi BSc/MSc/PhD Hallgatók bevonásával végezzük el.



1. ábra DE-MK Gépészmérnöki Tanszékén elérhető képzések

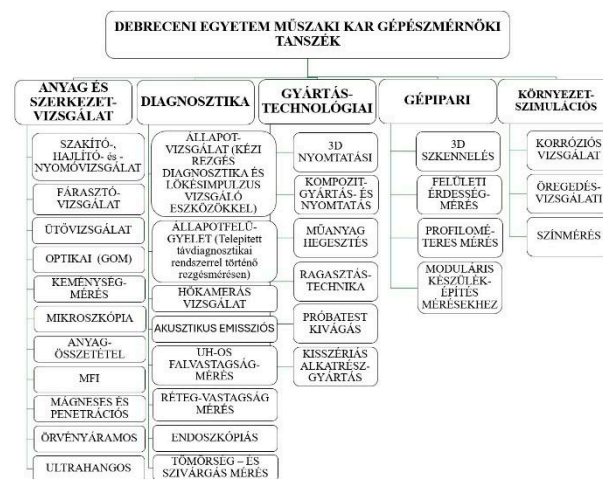
Az anyagvizsgálati ismeretek átadása a Hallgatóinknak kulcsfontosságú. Gépészmérnöki Tanszékén elérhető képzéseinket mutatja az 1. ábra. Évfolyamonként 100 fő körüli létszám, aki a Hallgatók közül közvetlenül találkozik anyagvizsgálati gyakorlati oktatással.

2.2. Anyagvizsgálat az ipari együttműködésekben

A Gépészmérnöki Tanszékén az évek során számos labor kiépítése valósult meg, amelyekbe berendezések, mérőeszközök kerültek telepítésre. Ez a fejlesztés széles skálán lefedi a gépészmérnök Hallgatók képzéséhez szükséges vizsgálatok spektrumát, úgy mint a diagnosztikai vizsgálatokat, gyártástechnológiai – és gépipari vizsgálatokat, anyag- és szerkezetvizsgálatokat és környezetszimulációs vizsgálatokat (2. ábra).

Az elmúlt években Debrecen az ország egyik legdinamikusabban fejlődő ipari központjává vált, ami magával hozta az egyre bővülő nagyvállalati jelenlétet. Ezzel párhuzamosan jelentősen megnövekedtek a Tanszékünk felé érkező ipari anyagvizsgálati felkérések.

Elsősorban az ipari partnerektől érkező vizsgálatok nagy száma járult hozzá ahhoz, hogy kialakítsunk egy kifejezetten anyagvizsgálati célra specializálódott laboratóriumot, ahol a mérések zavartalanul elvégezhetők a tanórák idejében lehetőséget adva arra, hogy kis számban Hallgatóink a laboratóriumba dolgozhassanak akár a tanórák idejében akár adott vizsgálati programokhoz vagy kutatási projektekhez kapcsolódva.



2. ábra DE-MK Gépészmérnöki Tanszékén elérhető szolgáltatások

A Laboratórium kialakítása óta több mint 2000 vizsgálatot hajtott végre a laboratórium csapata több, mint 10 partner megbízásából.

2.3. Anyagvizsgálat a kutatási programokban

A Tanszék működésének szerves részét képezi a tudományos kutatás, mely szintén megköveteli azt, hogy laboratóriumainkat a lehető legkorszerűbb, a komplex anyagvizsgálati feladatok elvégzését is lehetővé tevő eszközökkel, berendezésekkel szereljük fel.

Mindemellett a kutatási programok a laboratóriumban tovább növelik annak lehetőségét, hogy a Hallgatókat a különböző kutatási területekbe bevonva még szélesebb körben bővítsék ismeretüket az anyagvizsgálat terén.

Az anyagtudomány, így az anyagvizsgálat célterületei rendkívül széles skálán mozognak, rendkívül nagy az a terület, amelyet ez a tudományág felölel.

A Gépészmérnöki Tanszék Anyagvizsgáló Laboratóriuma elsősorban fémek anyagok roncsolásos anyagvizsgálatára specializálódott. Vizsgálataink nem csak a jelen kor tárgyaira fókuszálnak. Tudományos tevékenységeink egyike a régészeti korú tárgyak vizsgálata is. A 3. ábra erre mutat példát.

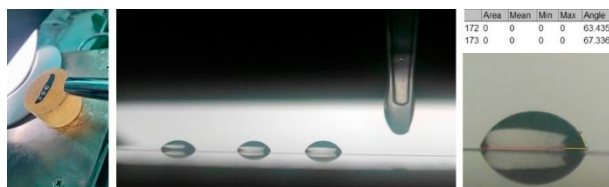
Roncsolásmentes vizsgálat nem csak ipari szerkezeteknél lehet szükség szerű, de adott esetben több száz, esetleg több ezer éves műemlékvédelem alatt álló tárgyak esetében is ez az eljárás, amennyiben a Múzeum nem ad engedélyt a leletek roncsolásos vizsgálatára, mintavételezésére.

Az 3. ábra jobb felső részén látható a tárgy szoknya részének felületéről készült elemtérkép. A tárgy arcáról 3D-s felvételt készítettünk. Ez esetben mintavételezés elvégzésére is sor került az ábrán látható kb. 3 mm nagyságú mintából síkcsiszolatot készítettünk és a hagyományos metallográfiai előkészítést követően 200x nagyításban látható a minta mikroszerkezeti felvétele, amely megmutatja nekünk a tárgy készítésének feltételezett technikáját. Ez a minta is csodálatos példája az anyagvizsgálat nagyszerűségének, a Hallgatóknak kiváló tanulmány arra vonatkozóan, hogy az anyagvizsgálati módszerek és az anyagismeret elsajátításával egy közel 1000 éves tárgy 3 mm-es darabkája, mintája a készítésének egész történetét elmeséli.



3. ábra Hódmezővásárhelyi Múzeumtól vizsgálatra kapott Árpád-kori lelet. SEM-EDS felvétel (Budai István) Mikroszerkezeti kép Nagyítás: 200x SmartZoom digitális mikroszkóp. Fent 3D felvétel az arcról

Régészeti korú vizsgált tárgyaink is fémes anyagok. Laboratóriumunk kialakítása, illetve kutatócsoportunk vizsgálatai széles körben igyekeznek a tudományos tevékenységeinket bővíteni. Vizsgálataink többek között különböző anyagok nedvesíthetőségének vizsgálatára is kiterjednek, mint például az alumínium vezetékek nedvesíthetősége, melynek a koronakisülés szempontjából van jelentősége, de kutatásaink különböző implantátumok humán biológiai folyadékok (pl. ízületi folyadék) nedvesíthetőségének vizsgálatára is kiterjednek. Magát a mérési rendszert és metodikát a Tanszéken fejlesztettük az általunk vizsgált anyagokhoz igazítva.



4. ábra Nedvesíthetőség vizsgálata kontaktszög méréssel

A példák is jól mutatják, hogy valóban széles körben végzi el Laboratóriumunk a különböző anyagvizsgálatokat. Nehéz becslést adni az érintett kutatási programok számáról és a részvétel mértékéről, mert szinte minden kutatási program igényli az anyagvizsgálati szolgáltatást.

3. ANYAGVIZSGÁLÓ LABORATÓRIUM FÓKUSZPONTJAI, ESETTANULMÁNYOK

Fémes anyagok roncsolásos anyagvizsgálatának szerves része a metallográfiai vizsgálat, mellyel pontos képet kapunk a vizsgált minta mikroszerkezetéről, szövetszerkezetéről. Tekintve a vizsgálandó anyagok és a vizsgálati célok sokféleségét ez sok esetben nem egyszerű feladat.

A metallográfiai vizsgálatok egy nagyon sarkalatos pontja a megfelelő mintavételezés, a minta levágása a vizsgálat tárgyáról. A nem megfelelő helyről vett minta, a szükségtelen mechanikai és hőhatás a szemcsék deformációjához, vagy fázisátalakulási folyamat megindulásához vezethet. Ezek együttesen pedig hibás következtetést, kiértékelést vonhatnak maguk után. Ezért a kérdés, hogy adott vizsgálati tárgyból honnan és hogyan veszünk mintát, az lényeges kérdés. Az oktatás során a Hallgatók megtanulják ezt a folyamatot is. Az Anyagvizsgáló Laboratóriumunkban e célra kézi – és gépi (precíziós) vágóeszközök állnak rendelkezésre.

A metallográfiai előkészítés folyamatának következő lépése a minta befogása. A minta rögzítésének is több módja ismert. A Tanszéken rendelkezésre álló melegbeágyazó berendezés, mellyel bakelitbe nyomás alatt, magas hőmérsékleten történik a minta beágyazása. Sok esetben azonban ez a megoldás nem használható, mert a magas hőmérséklet módosíthatja a vizsgált tárgyat. Erre jó példa a bemutatott régészeti vizsgálat mintája, ahol előre nem ismert a fémes minta állapota. Ilyenkor preferáljuk a két komponensű, hidegen kötő műgyantákat, amelyekkel biztonságosan és gyorsan elvégezhető a vizsgált minta befogása.

A mintákat mikroszkópos vizsgálatra kell előkészíteni, ezért síkcsiszolatot kell készíteni. Megfelelő mértékű (anyagtól függő) csiszolással és polírozással kémiai maratásra előkészítjük a mintát, majd a vizsgálatról függően az adott marószerszettel – mondhatjuk - előhívjuk a vizsgálni kívánt mikroszerkezetet.

A metallográfiai előkészítéshez elszívó telepítésével, illetve új csiszoló- és polírozógép beszerzésével szereltük fel az Anyagvizsgáló Laboratóriumot, ami jelentősen növelte a Laboratórium vizsgáló kapacitását és a vizsgálati lehetőségeket.

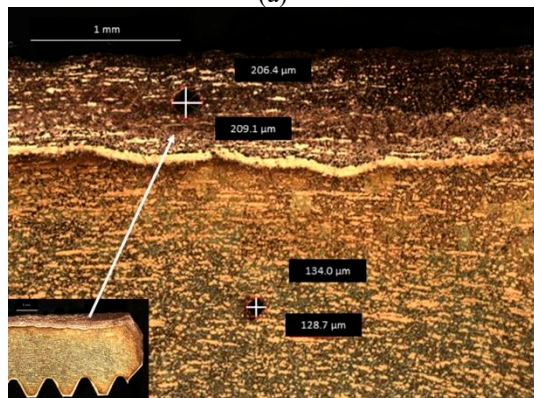
Fénymikroszkópos vizsgálatokhoz legyen az mikroszerkezeti vizsgálat, hegesztett kötések minősítése vagy rétegvastagság vizsgálata elengedhetetlen a megfelelő minőségű metallográfiai mintaelőkészítés. Hallgatóink ezzel is megismerkednek a gyakorlati oktatásban.

3.1. Korrózió hatásának, korróziós tönkremenetelek vizsgálata

Korróziós tönkremenetel vizsgálatokra többféle módszer áll rendelkezésre, többek között gravimetriai, örvényáramos/mágneses vizsgálatok. Metallográfiai vizsgálattal (lokális összetétel vizsgálattal kiegészítve, mellyel detektálható az anyag pontos kémiai összetétele) képet kaphatunk a korrózió anyagban végbemenő terjedéséről. Ezek a módszerek jól alkalmazhatók valós tönkremeneteli minták vizsgálatára, de jól kiegészíti a korróziós és környezeti hatások vizsgálatát, ahol a vizsgálati minták a szabványos értékelésen túl még ilyen módszerekkel is vizsgálhatók igény szerint.



(a)



(b)

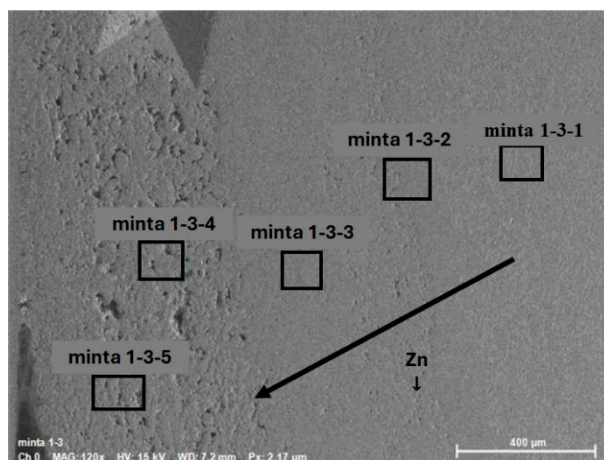
5. ábra Zeiss SmartZoom5: Maratott felület. Nagyítás: 100x

Egy jó példa a korrózió hatásainak vizsgálatára egyik esettanulmányunk, ahol sárgaréz gömbcsap tönkremenetelének okát felderítő vizsgálati folyamatot mutatunk be. Az 5. ábra a gömbcsapból vizsgálatra kivágott mintából metallográfiai mérésre előkészített csiszolat mikroszerkezetét mutatja.

A vizsgálat tárgya egy 2024-ben korszerűsített vízhálózatnál beépített gömbcsapok tönkremeneteli gyökérökének feltárása volt. A beépített sárgaréz gömbcsapok több beépítési helyen, az összeszerelt test mentes részénél eltörték. A csapok meghibásodása elárasztásokat vízkárokat okozott a munkaterület közelében található ingatlanokban, ezért kulcsfontosságú volt, hogy feltárjuk a hiba lehetséges oká(i)t. A gömbcsap kritikus részénél több helyről történt mintavételezés, hogy a csap minél több pontján annak lehetőleg teljes keresztmetszetében elvégezzük a vizsgálatot. Az 5. ábrán vas-kloridos maratást követően 100x nagyításban látható a gömbcsap szövetszerkezete, melyen látható, hogy az alapszövetet a sárgarézre jellemző α – és β fázisok alkotják. A mikroszkópi ábrán

az is megfigyelhető, hogy a felülethez közel, az alapszövetből eltérő réteg alakult ki. A mikroszerkezeti vizsgálat már rámutat arra, hogy a tönkremenetelnek feltételezhetően része volt az észlelt réteg. Annak meghatározására, hogy mi ez a réteg pontosan további vizsgálatokra van szükség. Elvégeztük a minták kémiai összetételének meghatározását. A vizsgálat elsősorban arra irányult, hogy van-e valami különbség az anyag és a detektált réteg között. Sárgaréz alapanyagról van szó melynek névleges Zn tartama 40%.

A 6. ábrán látható 5 mérési pontban vizsgáltuk a kémiai összetételt, amely mutatja, hogy már a felülethez közel (kb. 800 μ m távolságba a felülettől) is eltér a cinktartalom, de a minta szélén már egészen alacsony 1% körüli (minta 1-3-5 mérési pont) Zn tartalmat detektáltunk (1. táblázat).



6. ábra Kémiai összetétel meghatározás az alapanyagban és a felülethez közel (rétegben)

1. táblázat Kémiai összetétel

Kémiai összetétel [atom%]						
Spektrum	C	O	Cu	Zn	Pb	maradék
minta 1-3-1	9,37	1,42	52,92	36,31	-	-
minta 1-3-2	8,31	1,14	58,36	32,18	-	-
minta 1-3-3	5,99	2,62	66,56	23,97	0,44	0,42
minta 1-3-4	7,21	2,88	87,44	1,32	0,42	2,47
minta 1-3-5	7,47	3,62	86,38	1,42	0,19	2,53

Megmértük Vickers skála szerinti 1 kg terhelőerővel a keménységet mind az alapanyagban, mind a rétegben (2.táblázat). Az egyértelműen látszik, hogy a keménység értéke a rétegben mérve jelentősen lecsökkent az alapszövetéhez képest (5. ábra: keménységnyom átlói μ m egységekben).

A vizsgálatot több tárgyon, több helyről vett mintán végeztük el. Az eredmények hasonlóak a felülethez közel, a rétegben nagy mértékben lecsökken a Zn tartalom.

2. táblázat Keménységmérés eredményei

HV1	Mérési pontok					Átlag
	1.	2.	3.	4.	5.	
Minta-vétel1	96,4	102,3	102,4	105,4	89,9	101,2
Minta-vétel2	99,5	105,3	106,1	108,9	105,3	105,9
	Rétegbe mért keménység				54,4	48,3
Minta-vétel3	100,9	97,7	103,2	107,7	103,1	102,4
	Rétegbe mért keménység				48,5	25,1
Minta-vétel4	103,7	111	105,6	107,2	105,3	106,1
	Rétegbe mért keménység				49,3	
Minta-vétel5	101,8	116,9	115,6	105,6	107,2	109,5
Minta-vétel6	104,5	100,7	102,7	108,9	106,8	104,7

Sárgaréz korrozója vizes közegben lehet elcinktelenedés, lyukkorrózió, galván és feszültségkorrozíós folyamat [1]. Az eredményekből látható, hogy esetünkben a sárgaréz elcinktelenedése okozta a problémát. Az elcinktelenedés eredményeként megmaradt vörösréz gyengébb szivacsos struktúra formájában marad vissza. Jellemzően ebben az esetben a korrozio mélységben terjed, ami a tönkremenetelhez vezet. A tönkrement minta mellett vizsgáltunk referencia mintát is (5.(a) ábra), melyen nem találtunk ilyen tönkremenetelre utaló nyomokat. A minta szerkezete és szilárdsági tulajdonságai is megfeleltek az előírtaknak. A törést szenvedett minta agresszív korrozios közegnek volt kitéve, amely ezt a gyors tönkremenetelt eredményezte. A program további része arra fókuszált, hogy vizsgáljunk a tönkrement mintával azonos helyről, illetve eltérő helyről leszerelt gömbcsapokat és információt kapjunk arról, hogy ez az agresszív közeg csak a tönkrement alkatrész környezetében volt jelen vagy más területen is. A vizsgálatok rámutattak arra, hogy korrozio nyomai csak a szóban forgó tönkrement alkatrészszel megegyező helyről kiserelt gömbcsapoknál volt detektálható. További, a korrozios közegre irányuló vizsgálatok kimutatták a talajszennyezés jelenlétét.

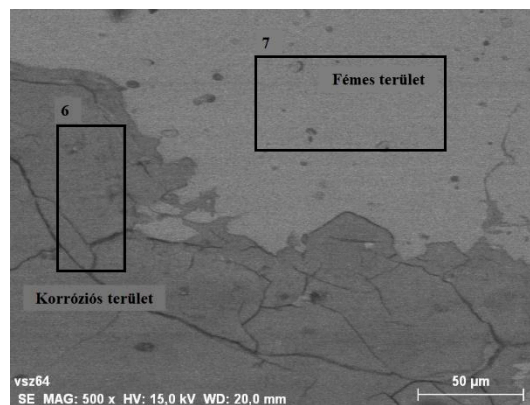
A keménységmérés eredményei arra is rámutattak, hogy egy gömbcsapból vett 6 mintából 3 mintavételezési helynél detektáltuk a korrodált réteg és abban az elcinktelenedés okozta keménység csökkenést (2.táblázat: mintavétel 2-3-4).

Az alábbi vizsgálati program is rámutat arra, hogy maga az anyagvizsgálat adott esetben milyen komplex. Több vizsgálati módszer elvégzésével kerülhetünk a probléma megoldásához. Ezért az egyik fő cél átadni a Hallgatóknak ezt a fajta gondolkodásmódot, amely elengedhetetlen a mérnöki gyakorlatban. Ehhez pedig elengedhetetlen a szükséges anyagismereti tudás átadása, illetve említett vizsgálati módszerek készség szintű elsajátítása a Hallgatók számára.

Összetételvizsgálatnál kardinális kérdés az is, hogy milyen módját választjuk az összetétel mérésének. Roncsolásmentesen felülethez közel, vagy a minta roncsolásos vizsgálatával mellyel nem csak az anyag átlagösszetételét vizsgálhatjuk, de akár az anyagban

fáziselemzés is végezhető, ami még teljesebb képet ad az anyag állapotáról.

A Gépészmérnöki Tanszéken többféle összetétel vizsgálatára (2. ábra) van lehetőség. Optikai Emissziós Spektrométeres mérés acél és alumínium ötvözetekre kalibrált, és csak roncsolásos vizsgálattal végezhető a mérés. Leginkább ipari együttműködés során elvégzett mérésekre alkalmas a berendezésünk. Hitachi gyártmányú elektronmikroszkóppal már lehetőség van különböző anyagok kémiai összetételének lokális meghatározására is EDS szondával. Kutatócsoportként együttműködve a HUN-REN Felületfizikai kutatócsoportjával, mind a kutatás, mind a mérések területén lehetőség van további spektroszkópos mérésekre (SIMS/SNMS), amely további információval akár az elemek kémiai kötésének meghatározásával egészíti ki a méréseket. Anyagtechnológia specializációra szakosodott Hallgatók Szerkezetvizsgálat c. tárgy keretében meg is ismerkednek az említett berendezések elméleti alapjaival, adott esetben gyakorlati működésével.



7. ábra Kémiai összetétel meghatározás fémes és korrozios területen (rétegben). Minta Vértesszőlősi bronzkori lelet: fecskéfarok alakú csüngő

3. táblázat Kémiai összetétel

Elemek	Korróziós terület	Fémes terület
C	12,12	5,4
O	26,30	0,28
Cu	18,13	82,28
Sn	33,23	6,08
Sb	3,45	0,72
maradék	6,77	5,24

A 7. ábrán egy bronzkori tárgyból vett minta keresztmetszeti csiszolatán végeztük a mérést fémes, illetve felülethez közel a korrozios rétegben. A 3. táblázat mutatja, hogy egy kb. 50 µm távolságban lévő területekről milyen eltérő eredmény detektálható. Ebben az esetben, ha egy felületi mérést választunk, a kapott eredmény nem helytálló, vagy téves megállapításhoz vezethet [2].

3.2 Metallográfiai vizsgálatok

Ahogy az előző pontban is olvasható volt, a korróziós tönkremenetel vizsgálatában is és a régészeti korú fém tárgyak vizsgálatában is a metallográfiai vizsgálat kulcs szerephez jut. Metallográfiai vizsgálattal elsősorban az anyagok mikroszerkezetéről kapunk információt, ami alapján azok állapotáról kapunk részletes képet. Ebben az esettanulmányban összekapcsolódik a korróziós hatás és a régészeti minta vizsgálatának kérdése. A bronzkori tárgyak jelentős mértékű általános korróziós hatásnak voltak kitéve deponálásuk után feltárásukig, majd esetleges restaurálásukig. Azaz a fém darab egy része eltűnt a hosszú idő alatt. A metallográfiai vizsgálattal ennek ellenére a lokális sajátosságokból részletes képet adhatunk a tárgy életciklusának egyéb szakaszairól, ami a régészeti kutatás számára fontos eredmény.



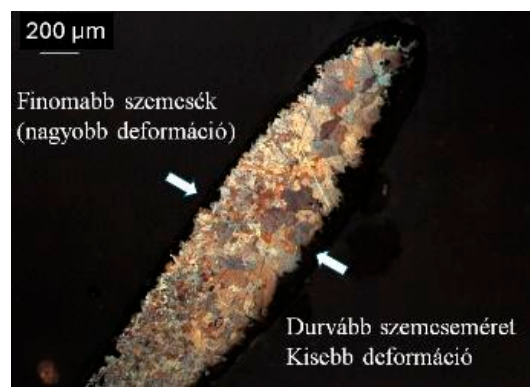
8. ábra Vértesszőlősen feltárt bronzkori ékszerlelet

A 9. ábrán két bronzkori ékszerből vett minta szövetképe látható. A metallográfiai előkészítés során a bronz minta maratását kálium-kromáttal végeztük. Polarizált megvilágításban az eltérő orientációjú szemcsék más-más színben látszanak.

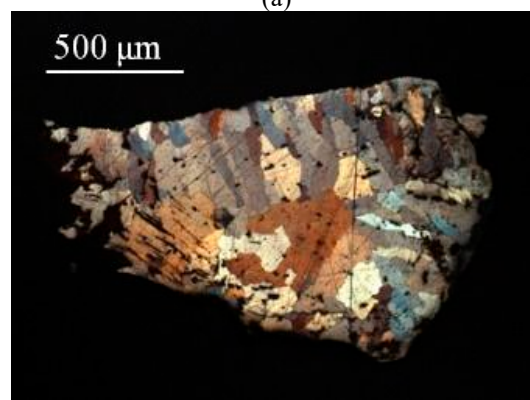
A 9.(a) ábrán egy újrakristályosodott szemcseszerkezet látható, ami azt jelenti, hogy az említett tárgyat (8. ábra: VSZ64) a készítése során alakították, a szemcsék deformációt szenvedtek és egy „hőkezelő” folyamaton is keresztülment. A mintát teljes keresztmetszetében újrakristályosodott szemcsék töltik ki [3]. Megfigyelhető továbbá, hogy a minta egyik oldalát finomabb, míg a másik oldalon durvább szemcsék töltik ki a szerkezetet. Ez arra utal, hogy egyik oldalról nagyobb deformációt kapott a minta, a nagyobb alakítási mérték hatására, több a csíráképző helyek száma így alakult ki ezen a részen egy finomabb szemcsékből álló szerkezet. A 6.(b) ábrán öntött szerkezet látható polarizált megvilágításban, tehát

a tárgyat (8. ábra: VSZ29) a bronzkorban formába öntötték [4].

Az alábbi példán keresztül látható, hogy egy mikroszerkezeti vizsgálatból egy bronzkori lelet készítése technikájáról is információt kaphatunk.



(a)



(b)

9. ábra Tatabányai Múzeumtól vizsgálatra kapott Vértesszőlősi bronz leletegyüttes mikroszerkezeti felvételei Polarizált megvilágítás. (a) Fecskefarok alakú csüngő. Újrakristályosodott szerkezet. Nagyítás: 50x (b) Szív alakú csüngő. Öntött szerkezet. Nagyítás: 100x

3.3 Hegesztett kötések vizsgálata

Hegesztett kötések minőségének ellenőrzése történhet roncsolásos vagy roncsolásmentes vizsgálattal. Az eljárásvizsgálatok által előírt valamennyi roncsolásos vizsgálat (szakító - és hajlítóvizsgálat, ütővizsgálat, keménységmérés és metallográfiai vizsgálat) elvégezhető a Gépészmérnöki Tanszéken (2. ábra).

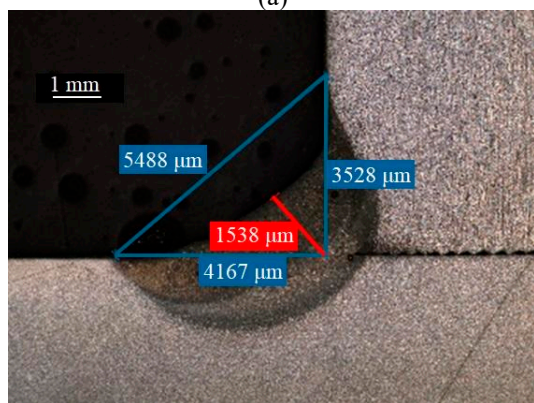
Hegesztett kötések hőhatásövezetének, valamint beolvadási mélységének vizsgálata metallográfiai vizsgálattal történik. A vizsgálat nagy jelentőségű annak megállapítására, hogy a hegesztett varrat megfelel-e az előírásoknak. A HAZ mérése információval szolgál a hegesztett kötés teherbírásáról és élettartamáról.

A hegesztési varratok előkészítése a szokásos metallográfiai eljárással történik. Vizsgáljuk saválló acélok hegesztett kötéseit, ebben az esetben a mikroszerkezet vizsgálata nem egyszerű. Speciális

marószerekkel tudjuk előkészíteni a vizsgált mintát. Az Anyagvizsgáló Laboratórium kialakításánál arra is tekintettel voltunk, hogy képesek legyünk a vizsgált anyagminőségeket bővíteni, ami mind az előkészítési folyamatot, mint a kémiai maratást érintik. Törekvésünk, hogy folyamatosan újabb és újabb anyagok, anyagkombinációk vizsgálatára készüljünk fel.



(a)



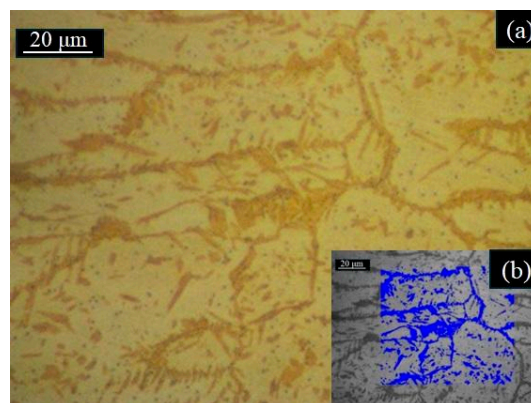
(b)

10. ábra (a) Saválló acél és (b) Szénacél hegesztett kötéseinek vizsgálata. Nagyítás: 34x

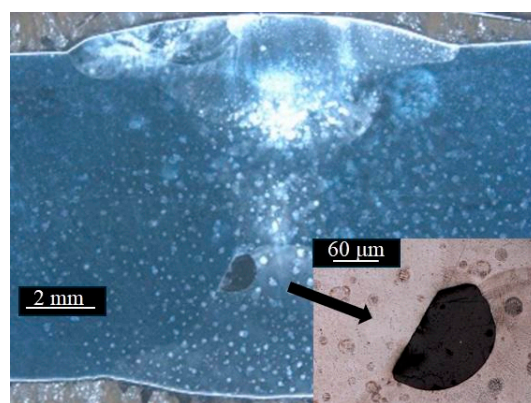
A 10.(a) ábra saválló acél hegesztett kötését mutatja 34x nagyításban. A mintát királyvízzel maratottuk. Kis nagyításban is jól látható a varrat szerkezete és a körülötte kialakult hőhatás övezet. A 10.(b) ábrán szénacél hegesztett kötésének beolvadási mélységét vizsgáltuk.

A metallográfiai mérés pontos képet ad a varrat mechanikai tulajdonságairól, annak szövetszerkezetének vizsgálatával és mérésével. A 11.(a) ábrán saválló (duplex) acél hőhatás övezetének mikroszerkezeti ábrája látható 500x-os nagyításban. A saválló acél szövetét ferrit és ausztenit alkotja, ahol a ferrit a ridegebb az ausztenit a lágyabb szövetelem. Ezek aránya információt ad a hegesztett kötés mechanikai tulajdonságáról. A 11.(b) ábrán a ferrit mennyiségének meghatározását végeztük el számítógépi képelemzéssel [5]. Ebben az esetben is a pontos méréshez nagyon fontos a megfelelően előkészített metallográfiai minta. A mérés során az eredeti mikroszerkezeti képből szürkeképet készítettünk és a mérés során a két szövetelemet

szürkeségi szintjük szerint választjuk el. A nem megfelelő előkészítés pontatlan mérést eredményez. A 12. ábra a varratban lévő zárvány jelenlétét mutatja.



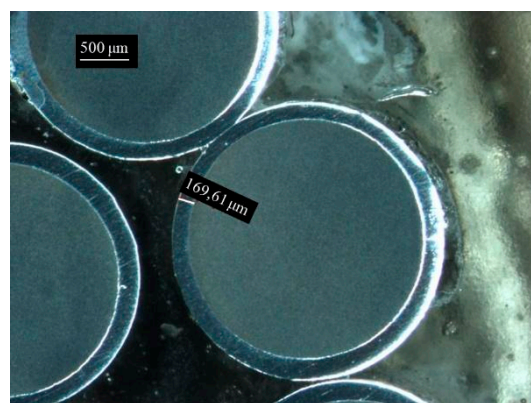
11. ábra Ferrit mennyiségének vizsgálata



12. ábra Zárvány a hegesztett kötésben

3.3 Rétegvastagság vizsgálat

A különböző rétegek vastagságát különböző módszerekkel lehet vizsgálni, de a metszetben végzett optikai vizsgálat a legtöbb vizsgálati eljárásban szerepel.



13. ábra Acélhuzalon lévő alumínium rétegvastagságának mérése

Rétegvizsgálat során legyen az valamilyen felületkezelte réteg vagy bevonat vizsgálata nagyon fontos a megfelelő metallográfiai mintaelőkészítés úgy, hogy az adott réteg

- mivel az a metszet felületén van - ne sérüljön az előkészítés során. Ne mérjünk kisebb vagy nagyobb rétegvastagságot az előkészítés miatt. Ezen felül természetesen a megfelelő nagyítástartományú mikroszkóp is elengedhetetlen a pontos méréshez. A Laboratóriumunk több mikroszkóppal is fel van szerelve, hogy a megfelelő vizsgálati eljárásoknak megfelelő felvételek készüljenek el.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A Gépészmérnöki Tanszék Anyagvizsgáló Laboratóriumának létrehozásával az anyagvizsgálat lehetőségeit bővítettük ki szem előtt tartva az ipari partnereinknél felmerülő problémák igényeit, az oktatás magas szintű gyakorlat orientáltságát és a felmerülő kutatási területekhez tartozó minél több mérési rendszer kialakítását. A Laboratóriumban teljes egészében elvégezhető az anyagvizsgálat és kapcsolódó folyamatok pl. a mintavételezés/előkészítéstől, a minta mikroszkópos vizsgálatáig. A bemutatott esettanulmányok példák csupán arra, hogy milyen távoli területeken felmerülő problémákat képes kezelni, megoldani a Laboratórium csapata. Igyekeztünk bemutatni azt is, hogy nem csak magunk, hanem szükség esetén a Debreceni Egyetem egyéb mérési/vizsgálati lehetőségeivel is ki tudjuk egészíteni a szükséges vizsgálati spektrumot. Szoros szakmai együttműködésben kínálunk nem csak komplex, hanem speciális vizsgálati lehetőségeket.

A Laboratórium bővítésével és az említett munkamódszerrel a gépészmérnök Hallgatók is elsajátítják a vizsgálati folyamat összes fázisát és azt a komplex gondolkodásmódot, ami képessé teszi őket arra, hogy leendő munkahelyükön anyagvizsgálati kérdéseket is meg tudjanak oldani. A Laboratóriumaink legfőbb küldetése ez, hogy korszerű ismeretekkel lássa el a terület iránt érdeklődő hallgatóinkat.

Ahogy az esettanulmányokban is sugalljuk a Laboratórium fejlesztése, fejlődése itt nem áll meg. További ipari, kutatási együttműködésekben új problémák megoldásán keresztül fejlesztjük mind a laboratórium infrastruktúráját, mind tudásbázisát. Azonban a fenti bekezdés alapján ez az infrastruktúra és tudásbázis azt a célt szolgálja, hogy az anyagvizsgálat oktatása is folyamatosan fejlődjön a Gépészmérnöki Tanszéken. Várjuk az Ön problémáját is.

5. SUMMARY

With the establishment of the Materials Testing Laboratory at the Department of Mechanical Engineering, we have expanded the materials testing capabilities, taking into account the materials testing problems of our industrial partners, the need for a highly practice-oriented educational, and the development of a wide range of measurement systems to support our research areas.

The Laboratory is capable of carrying out the complete material testing process, from sampling and

sample preparation to microscopic analysis. The case studies presented here only illustrate the wide range of problems the Laboratory team is capable of solving. We also aim to demonstrate that we can complement the desired testing spectrum, not only on our own but when necessary by taking advantage of the opportunity of other measurement and testing capabilities available at the University of Debrecen. Through close professional collaboration we offer not only versatile but also specialized testing options.

Through the development of the Laboratory and with the applied working methods, mechanical engineering students learn every phase of the testing process and obtain the comprehensive perspective needed to solve materials testing challenges in their future workplaces. The primary mission of our Laboratory is to support up-to-date knowledge to students interested in this field.

As suggested by our case studies, the development and evolution of the Laboratory do not stop here. Through further industrial and research collaborations focused on solving new problems, we are continuously developing both the laboratory's infrastructure and its knowledge base. However, based on the paragraph above, the aim of this infrastructure and knowledge base is to ensure the continuous development of materials testing education of the Department of Mechanical Engineering. We look forward to addressing your specific challenges as well.

6. IRODALOM

- [1] A. O. OLOFINJANA, R. HAQUE: *Analysis of failure in a nickel coated brass dolphin striker component, Engineering Failure Analysis, Vol 77, pp.48-57, 2017*
- [2] HORVÁTH T., CSEH J., BARKÓCZY P., JUHÁSZ L., GULYÁS S., BERNERT Zs., BUZÁR Á.: *A double burial of the Baden culture from Tatabánya–Delphi (northern Transdanubia, Hungary): A case study of the Dentalium beads of the Baden culture and their interpretation, QUATERNARY INTERNATIONAL 539 pp. 78-91., 14 p., 2020*
- [3] BARKÓCZY P., ROÓSZ A., GEIGER J.: *Simulation of Recrystallization by Cellular Automaton Method, MATERIALS SCIENCE FORUM 414-415 pp. 359-363. , 5 p., 2003*
- [4] PÓLISKA Cs., GÁCSI Z., BARKÓCZY P.: *The Effect of Melt Flow on the Dendrite Morphology, MATERIALS SCIENCE FORUM 508-509 pp. 169-174. , 6 p., 2006*
- [5] BUBONYI T., BARKÓCZY P., KEMÉNY A., Gácsi Z.: *Microstructural characterization of bimodal composite metal foams under compression with machine learning, COMPOSITES PART A-APPLIED SCIENCE AND MANUFACTURING 185 Paper: 108292 , 7 p., 2024*

A TÁRCSAMARÓK GEOMETRIAI ÉS ÉLEZÉSI JELLEMZŐINEK VIZSGÁLATA A VEZÉRTÁRCSA ÉS A HÁTRAMUNKÁLÁSI GÖRBÉK ALAPJÁN

INVESTIGATION OF THE GEOMETRICAL AND SHARPENING CHARACTERISTICS OF DISC MILLING CUTTERS BASED ON THE CONTROL CAM AND RELIEF GRINDING CURVES

Dr. Bodzás Sándor*, Dr. Szanyi Gyöngyi**

ABSZTRAKT

A tárcsamarók forgácsolási teljesítményét és élettartamát jelentős mértékben befolyásolják a szerszám geometriai és élezési jellemzői. E paraméterek alakulásában meghatározó szerepet játszik a hátramunkálási folyamat, amelyet a vezértárcsa geometriája határoz meg. A tanulmány áttekinti a tárcsamarók geometriai sajátosságait, valamint a vezértárcsa és a kialakuló hátramunkálási görbék közötti kapcsolatot. Bemutatja azokat a főbb problémaköröket és kutatási kérdéseket, amelyek a szerszámprofil, a hátszögviszonyok és az utánélezhetőség vizsgálata során felmerülnek. A munka célja a további geometriai modellezési és elemzési vizsgálatok megalapozása.

ABSTRACT

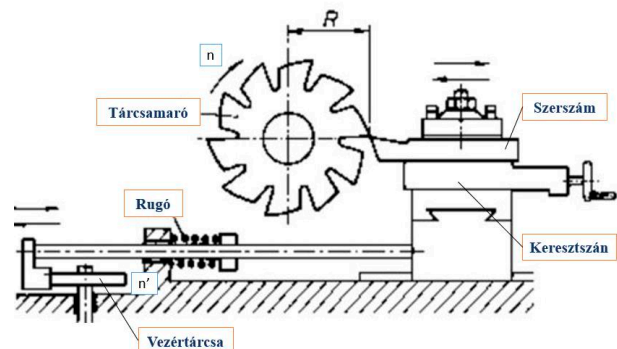
The cutting performance and service life of disc milling cutters are significantly influenced by their geometric and sharpening characteristics. The development of these parameters is largely determined by the relief grinding process, which is governed by the geometry of the control cam. This paper provides an overview of the geometric features of disc milling cutters and examines the relationship between the control cam and the resulting relief curves. The main issues and research questions related to tool profile geometry, clearance angle characteristics, and re-sharpening capability are discussed. The aim of the study is to establish a foundation for further geometric modeling and analytical investigations.

1. BEVEZETÉS

A forgácsolószerszámok geometriai kialakítása alapvetően meghatározza a megmunkálási folyamat hatékonyságát, a munkadarab minőségét, valamint a szerszám élettartamát. A profilozott tárcsamarók a gépipari gyakorlatban széles körben alkalmazott szerszámok, amelyekkel összetett alakú felületek és

profilok nagy pontosságú megmunkálása valósítható meg. Az ilyen szerszámok esetében különösen fontos követelmény, hogy az élezési műveletek során a forgácsolóél geometriája és a kialakított profil a lehető legnagyobb mértékben megőrizhető legyen [1, 5, 8].

A tárcsamarók gyártása során a megfelelő hátszög kialakítása rendszerint hátramunkálással történik, amelynek kinematikáját hagyományosan vezértárcsás mechanizmus biztosítja. A vezértárcsa geometriai kialakítása közvetlenül meghatározza a szerszám felületén létrejövő hátramunkálási görbét, ezáltal pedig jelentős hatást gyakorol a forgácsolóél környezetében kialakuló geometriai viszonyokra. A hátramunkálási görbe alakja nemcsak a szerszám működési jellemzőit befolyásolja, hanem az utánélezések során bekövetkező geometriai változások mértékét is (1. ábra) [1, 5, 6, 8].



1. ábra. A hátraesztérgálás folyamata

A korszerű forgácsolástechnikai követelmények egyre nagyobb hangsúlyt helyeznek a szerszámgeometria pontos ismeretére és előzetes modellezésére.

Különösen fontos annak feltárása, hogy a különböző hátramunkálási görbék milyen mértékben befolyásolják a hátszög alakulását, a profilpontosság megőrzését, valamint a szerszám utánélezhetőségét.

Jelen tanulmány célja a tárcsamarók geometriai és élezési jellemzőinek áttekintése a vezértárcsa és a

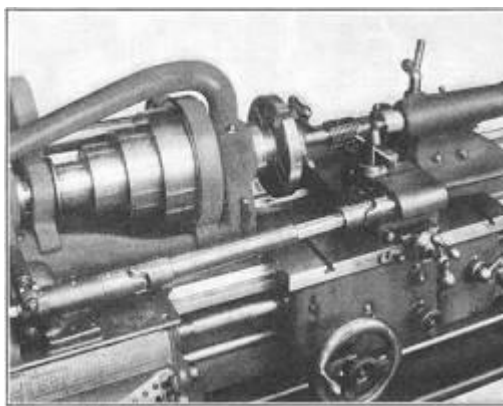
* egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Gépészmérnöki Tanszék

** egyetemi adjunktus, Debreceni Egyetem, Műszaki Alaptárgyi Tanszék

hátramunkálási görbék kapcsolatának vizsgálatán keresztül.

2. A HÁTRAESZTERGÁLÁS TECHNIKATÖRTÉNETE

A hátraesztergálás kialakulása szorosan összefügg a profilozott forgácsolószerszámok ipari alkalmazásának elterjedésével a XIX. század második felében. A marógépek és a tárcsamarók fejlődése során egyre nagyobb igény jelentkezett olyan szerszámgeometriák kialakítására, amelyek ismételt élezés esetén is képesek megőrizni eredeti profiljukat. Ebben jelentős szerepet játszott Joseph R. Brown munkássága [9, 10], aki az 1860-as években olyan marószerszám-geometriákat dolgozott ki, amelyek lehetővé tették a többszöri utánélezést a forgácsolóképeség jelentős romlása nélkül. A korszerű marószerszámok fejlődése az 1870-es évekre már nemzetközi szinten is ismertté vált.



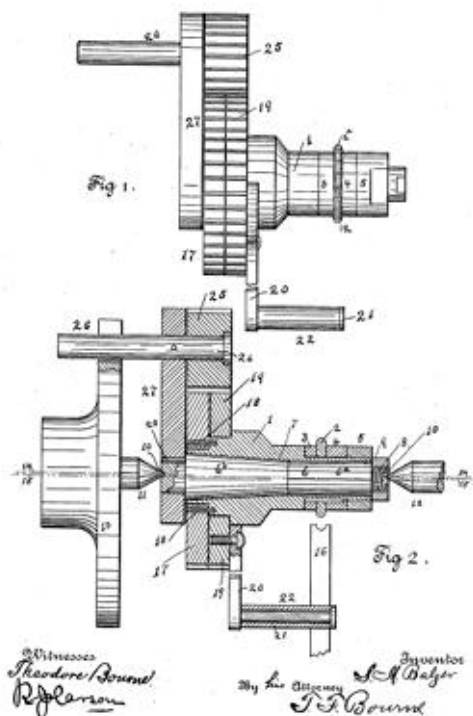
2. ábra. A világ első hátraeszterga gépe (Julius Edward Reinecker, 1872) [2]

Amikor Reinecker 1872-ben megalkotta a gépét [2], az egy különálló, méregdrága, dedikált szerszámgép volt. Ha egy gyár hátraesztergált marókat akart készíteni, meg kellett vennie a komplett Reinecker-féle hátraesztergát, ami csak és kizárólag erre a feladatra volt jó, és hatalmas helyet foglalt (2. ábra).

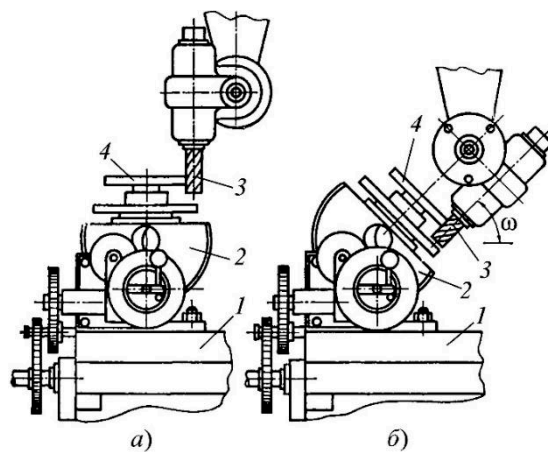
A hátramunkált szerszámok gyártására szolgáló speciális szerkezetek a XIX. század végén és a XX. század elején jelentek meg. Ebből az időszakból ismert Stephen M. Balzer neve, akinek hátramunkáló berendezését a szakirodalom már 1895-ban ismertette (3. ábra) [3]. Az ilyen mechanikus szerkezetek vezértárcsák, excenterek és racsnis mechanizmusok segítségével hozták létre a szükséges radiális mozgást a szerszám fogai mögött kialakítandó hátszög biztosítására.

A XX. század elején a hátraesztergálás elmélete és gyakorlata tovább fejlődött, és a profilozott forgácsolószerszámok gyártásában egyre nagyobb jelentőséget kapott a kinematikailag vezérelt hátramunkálás. A korszak szakirodalmában olyan eszterga-kiegészítések és vezértárcsa vezérlésű megoldások jelentek meg, amelyek Archimédeszi spirálhoz közelítő hátramunkálási pályát hoztak létre [4],

elsősorban csigamarók és egyéb profilozott szerszámok gyártásának támogatására (4. ábra). Ebben az időszakban vált általánosan elfogadottá az a felismerés, hogy a hátramunkálási görbe megfelelő geometriai kialakítása alapvető feltétele a profilpontosság megőrzésének és az ismételt utánélezhetőség biztosításának.



3. ábra. Balzer-féle hátramunkáló szerkezet nézeti és metszeti rajza (1895) [3]



4. ábra. Vezértárcsás hátramunkáló mechanizmus kinematikai vázlata (kb. 1905–1930) [4]

A speciális hátraesztergagépek fejlesztésében meghatározó szerepet játszott a németországi J. E. Reinecker vállalat, amelyet 1859-ben alapítottak Chemnitzben. A vállalat a XX. század közepére a szerszámgyártó gépek egyik vezető fejlesztőjévé vált, és 1949-től kezdődően hátraeszterga- és szerszámköszörű gépek gyártásával is foglalkozott.

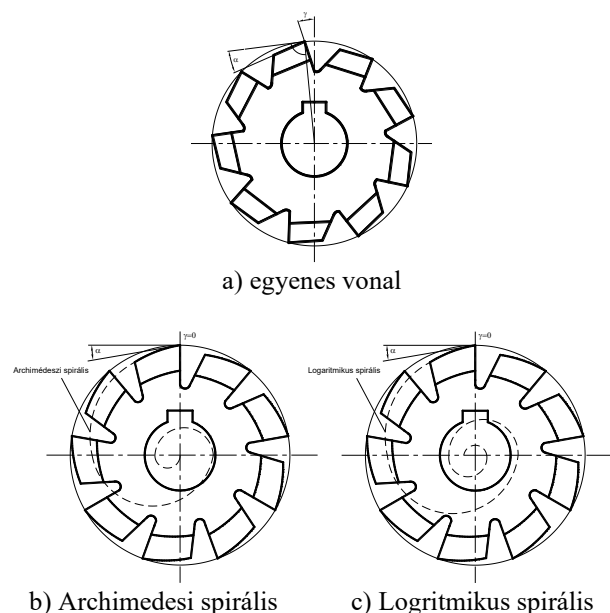
Napjainkban a hagyományos vezértárcsás hátraesztérgálást egyre gyakrabban váltják fel CNC-vezérlésű szerszámköszörű és profilgeneráló rendszerek, ugyanakkor a hátramunkálási görbék geometriai leírása, valamint azok hatásának vizsgálata a szerszámprofilra és az utánélezhetőségre továbbra is aktuális kutatási terület.

3. A TÁRCSAMARÓK GEOMETRIAI SAJÁTOSSÁGAI

A tárcsamarók a forgácsoló szerszámok azon csoportjába tartoznak, amelyek forgómozgás révén végzik az anyagleválasztást [1, 5, 8].

Geometriai kialakításuk jelentős hatással van a forgácsolási folyamatra, a szerszám éltartamára, valamint a megmunkált felület minőségére [1, 5, 8].

A tárcsamarók fogainak alakját és elrendezését úgy alakítják ki, hogy a forgácsképződés kedvező feltételek mellett menjen végbe, miközben biztosított legyen a megfelelő szilárdság és a gazdaságos újraélezhetőség (5. ábra).

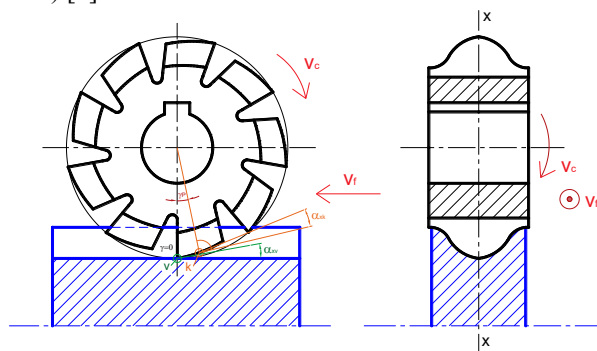


5. ábra. Marófajták különböző hátraesztérgálási módon

A hátraesztérgált szerszámok vágóélét a sík homloklapfelület és az alakos hátfelület metszévonalára határozza meg. Mivel a megmunkálandó profil és a homloklapfelületben megjelenő szerszámprofil teljes mértékben megegyeznek, a homlokszöget (γ_x) általában nulla értékre alakítják ki (6. ábra) [5].

A profilállandóság biztosítása olyan hátraesztérgált hátfelület kialakításával érhető el, amely mellett a hátszög értéke az ismételt élezések során sem változik. Ennek feltétele, hogy a vágóél α_{xk} hátszöge a k pontig történő leköszörülés után is megegyezzen a szerszámcúson érvényes α_{xv} hátszöggel. Ezt a követelményt a logaritmus spirális alakú hátfelület teljesíti, amely biztosítja a hátszög állandóságát és ezáltal

a szerszámprofil megőrzését az élezési ciklusok során (6. ábra) [5].



6. ábra. Az α_{xv} és α_{xk} hátszögtértékek hátraesztérgált maró első- és utolsó élezésekor

Az archimédeszi spirális hátraesztérgálási görbe alkalmazása esetén a hátszög változása viszonylag csekély mértékű, ezért a gyakorlatban a tárcsamarókat többnyire ilyen görbe alapján munkálják hátra. A logaritmus spirális kialakítást rendszerint csak olyan speciális esetekben alkalmazzák, amikor a hátszög teljes állandóságának biztosítása kiemelt követelmény. Az Archimédeszi-spirális széles körű elterjedését elsősorban az indokolja, hogy az ehhez tartozó vezértárcsa gyártása és alkalmazása technológiai szempontból egyszerűbb és gazdaságosabb megoldást jelent [5].

A H hátraesztérgálás mértékének közelítő képlete logaritmus és archimédeszi spirális esetén [5, 11]

$$H = \frac{D \cdot \pi}{z} \cdot \tan \alpha_x \quad (1)$$

ahol:

H – a hátraesztérgálás mértéke [mm],

D – a maró névleges külső átmérője [mm],

z – a maró fogszáma,

α_x – maró hátszög $[\circ]$

A homlokszög (γ) befolyásolja a forgács leválasztásának módját és a forgácsoló erők nagyságát, míg a hátszög (α) biztosítja, hogy a szerszám hátfelülete ne érintkezzen káros mértékben a megmunkált felülettel. Az ékszög (β) a vágóél mechanikai szilárdságának egyik meghatározó paramétere [1, 5, 8].

A hátraesztérgált marófog hátfelületének geometriai kialakítására elméletileg logaritmus, a gyakorlatban pedig gyakran archimédeszi spirált alkalmaznak. A két görbe közötti alapvető különbség a sugár és az elfordulási szög kapcsolatában jelentkezik. A logaritmus spirál polárkoordinátás egyenlete [11, 12, 13, 14]:

$$r(\varphi) = r_0 \cdot e^{-k\varphi} \quad (2)$$

ahol:

$r(\varphi)$ – az aktuális sugár [mm],

r_0 – a kiindulási sugár [mm],

φ – az elfordulási szög $[\circ]$,

k – a logaritmikus spirál paramétere.

A spirál paramétere és a hátszög kapcsolata:

$$k = \tan \alpha_x \quad (3)$$

Az archimédeszi spirál hátraesztorgálási mérete [11, 12, 13, 14]

$$r(\varphi) = r_0 - c \cdot \varphi \quad (4)$$

ahol c az egységnyi szögelfordulásra jutó radiális méretváltozás. A kiindulási pontban:

$$c = r_0 \cdot \tan \alpha_x \quad (5)$$

Az archimédeszi spirálnál az adott pontbeli hátszög változik:

$$\tan \alpha(\varphi) = \frac{c}{r_0 - c \cdot \varphi} \quad (6)$$

A két spirál matematikailag természetesen nem azonos, de a megfelelő feltételek mellett a logaritmikus spirál egzakt hátraesztorgálás mértékének összefüggése elsőrendű közelítéssel ugyanarra a képletre vezet, mint az archimédeszi spirálisé [11, 12, 13, 14]

$$H_{\text{archimédeszi}} = \frac{D \cdot \pi}{z} \cdot \tan \alpha_x \quad (7)$$

$$H_{\text{logaritm. (egzakt)}} = \frac{D}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot \pi}{z} \tan \alpha_x} \right) \quad (8)$$

$$H_{\text{logaritm. (közelítő)}} \approx \frac{D \cdot \pi}{z} \cdot \tan \alpha_x \quad (9)$$

Fő feltételezések [16]:

- kis szögelfordulást vizsgálunk,
- a logaritmikus spirál exponenciális tagját elsőrendű Taylor-közelítéssel helyettesítjük,
- a másod- és magasabb rendű tagokat elhanyagoljuk,
- a vizsgált kis tartományban a sugárváltozás közel lineáris a szögelfordulással.

A fogak száma, osztása és elrendezése szintén lényeges geometriai paraméterek. Ha a marónak z db foga van [11, 12, 13, 14]

$$\Delta \varphi = \frac{2 \cdot \pi}{z} \quad (10)$$

A maró sugara pedig [11, 12, 13, 14]

$$r_0 = \frac{D}{2} \quad (11)$$

ahol D a maró névleges külső átmérője.

A nagyobb fogszám egyenletesebb forgácsolást és jobb felületi minőséget eredményezhet, ugyanakkor csökkenti az egy fogra jutó forgács térfogatot [1, 5, 8].

Közönséges hátraesztorgált fogú alakmaró fogszámának meghatározásához ajánlott tapasztalati képlet [5]:

$$z = 0.5 \cdot \frac{D}{\sqrt[3]{h_z^2}} \quad (12)$$

ahol:

h_z – a maró élprofiljának magassága [mm]

A (12) összefüggés a közönséges hátraesztorgált fogú alakmarók fogszámának közelítő meghatározására szolgáló tapasztalati (empirikus) képlet. A képlet bal oldalán szereplő z fogszám dimenzió nélküli mennyiség, míg a jobb oldalon található D maróátmérő és h_z élprofilmagasság hosszúságdimenzióval rendelkező geometriai paraméterek, amelyek értékét milliméterben kell megadni. A (12) képlet ezért szigorú értelemben nem dimenzióhomogén elméleti összefüggés. Ennek oka, hogy nem fizikai alapegyenletekből történő levezetéssel, hanem gyakorlati tapasztalatok és korábbi szerszámkonstrukciók geometriai adatai alapján határozták meg. A képletben szereplő 0,5 tapasztalati együttható a választott mértékegységrendszerhez is kötődik, ezért az összefüggés alkalmazásakor a D maróátmérőt [mm] és a h_z élprofilmagasságot [mm] következetesen milliméterben kell behelyettesíteni. Más mértékegység alkalmazása esetén a 0,5 tapasztalati együttható értékét is megfelelően módosítani kell [5, 11].

Ha a marónak erősített fogai vannak, akkor a fogszám meghatározásához használható képlet [5]:

$$z = (0.6 \div 0.7) \cdot \frac{D}{\sqrt[3]{h_z^2}} \quad (13)$$

A (13) összefüggés az erősített fogú hátraesztorgált alakmarók fogszámának közelítő meghatározására szolgáló tapasztalati (empirikus) képlet. A képlet bal oldalán szereplő z fogszám dimenzió nélküli mennyiség. A jobb oldalon található D maróátmérő és h_z élprofilmagasság ezzel szemben hosszúságdimenzióval rendelkező geometriai paraméterek, amelyek értékét milliméterben kell megadni [5, 11, 13].

A 0,6 ÷ 0,7 közötti tapasztalati együttható az erősített fog kialakítás figyelembevételére szolgál. A közönséges fogú alakmaróknál alkalmazott 0,5 értékhez képest nagyobb együttható azonos maróátmérő és profilmagasság mellett nagyobb számított fogszámot eredményez. Az adott tartományon belüli konkrét érték megválasztása a szerszám konstrukciójától, a fogak geometriai kialakításától és a szükséges forgács térfogat nagyságától függ [5, 11, 13].

Mivel az összefüggés tapasztalati eredetű, szigorú értelemben ez sem tekinthető dimenzióhomogén elméleti egyenletnek. A 0,6 ÷ 0,7 közötti együttható a választott mértékegységrendszerhez is kötődik, ezért a D maróátmérőt [mm] és a h_z élprofilmagasságot [mm] következetesen milliméterben kell a képletbe behelyettesíteni. A számításnál kapott z fogszámot a gyakorlati szerszámkonstrukció követelményeinek megfelelő egész értékre kell megválasztani [5, 11, 13].

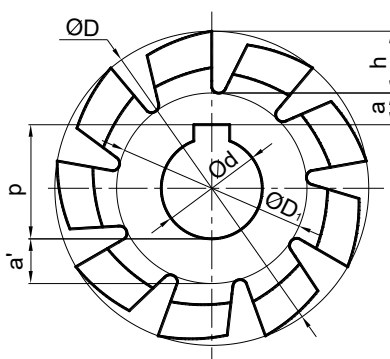
A fogosztás megválasztásánál figyelembe kell venni a megmunkálendő anyag tulajdonságait, a forgácsolási paramétereket és a szerszám várható terhelését [5].

A forgácsoló ϑ szöge hátraesztergált marók esetén legtöbbször 20° , 25° vagy 30° [5].

A tárcsamarók geometriai vizsgálata során különös figyelmet kell fordítani a vezértárcsa profilja és a létrejövő hátramunkálási görbe közötti kapcsolatra. A vezértárcsa alakja közvetlenül meghatározza a hátfelület geometriáját, ezáltal a hátszög változását és az újraélezés utáni szerszámgeometriát. A geometriai összefüggések pontos ismerete lehetővé teszi olyan tárcsamarók tervezését, amelyek kedvező forgácsolási tulajdonságokkal rendelkeznek, és több élezési ciklus után is megőrzik funkcionális jellemzőiket [1, 5, 8].

A maró d furatátmérőjének megválasztása a marótest szilárdsági szempontjai alapján történik. A számítás során egy D_1 átmérőjű gyűrűt veszünk figyelembe, amelyet a maró furatfelülete és a forgácsoló hátrészének fenékfelülete határol (7. ábra) [5]:

$$D_1 = D - 2 \cdot h \quad (14)$$



7. ábra. A maró furatátmérőjének megállapítása

A számítások során elfogadjuk azt a feltételt, hogy a gyűrű vastagsága – a reteszhorony hatásának elhanyagolása mellett – nem csökkenhet $0.3 \cdot d$ érték alá [5]. Vagyis:

$$d + 2 \cdot a' \leq D_1 \quad (15)$$

tehát

$$d + 0.6 \cdot d \leq D_1 \quad (16)$$

azaz

$$d \leq 0.625 \cdot D_1 \quad (17)$$

A d átmérőnek a (17) képlettel való meghatározása után ellenőrizni kell a marótest gyűrűjének a vastagságát a reteszhorony figyelembevételével [5]:

$$a = \frac{D}{2} - h - \left(p - \frac{D}{2} \right) \quad (18)$$

Ahol a p táblázatban megtalálható reteszhorony méret.

Ha a (18) képlet alkalmazásával számított gyűrűvastagság nagyobb, mint $0.3 \cdot d$, akkor a maró furatátmérőjét kisebb értékre kell választani.

3.1. Az archimédeszi és logaritmikus spirális hátfelületű marók összehasonlító vizsgálata

A vizsgálat célja az archimédeszi és logaritmikus spirális hátfelületű marók geometriai összehasonlítása, elsősorban a hátraesztergálási mérték és az adott pontbeli hátszög változásának szempontjából. Azonos maróátmérő, fogszám és névleges hátszög mellett meghatározható mindkét spirálhoz tartozó radiális méretcsökkenés, majd ezek eltérése.

Az összehasonlító vizsgálathoz az alábbi kiinduló adatokat használtuk (1. táblázat). A számszerű összevetéshez példaként $D=100$ mm maróátmérőt választottunk; a fogszámot és a névleges hátszöget több értéken vizsgáltuk.

1. táblázat. Kiinduló adatok

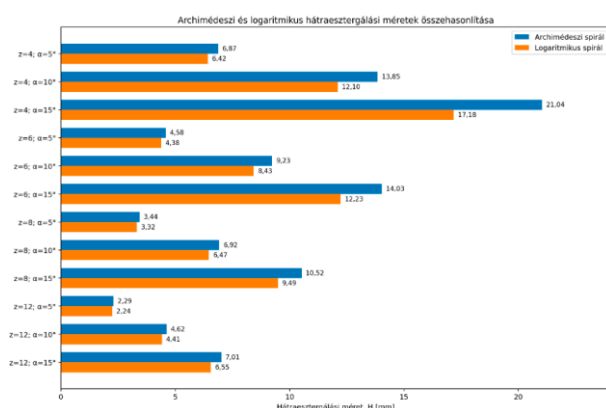
Jelölés	Megnevezés	Vizsgált érték
D	Maróátmérő	100 mm
r_0	Kiindulási sugár, $(D/2)$	50 mm
z	Fogszám	4; 6; 8; 12
α_x	Névleges hátszög	5° ; 10° ; 15°
$\Delta\varphi$	Egy fogosztáshoz tartozó szögelfordulás	$\Delta\varphi = \frac{2 \cdot \pi}{z}$
H_a	Archimédeszi spirál hátraesztergálási mérete	$\frac{D \cdot \pi}{z} \cdot \tan \alpha_x$
H_l	Logaritmikus spirál hátraesztergálási mérete	$\frac{D}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot \pi}{z} \tan \alpha_x} \right)$

2. táblázat. Eredmények

Fogszám z	Hátszög α_x	Archimédeszi H_a [mm]	Logaritmikus H_l [mm]	Eltérés [%]
4	5°	6,87	6,42	6,57
4	10°	13,85	12,10	12,65
4	15°	21,04	17,18	18,38
6	5°	4,58	4,38	4,44
6	10°	9,23	8,43	8,69
6	15°	14,03	12,23	12,80
8	5°	3,44	3,32	3,36
8	10°	6,92	6,47	6,62
8	15°	10,52	9,49	9,82
12	5°	2,29	2,24	2,26
12	10°	4,62	4,41	4,48
12	15°	7,01	6,55	6,70

Az eredmények a 2. táblázatban azt mutatják, hogy azonos kiinduló geometriai adatok mellett a logaritmikus spirál hátraesztergálási mérete minden esetben kisebb, mint az archimédeszi spirálé (8. ábra). Az eltérés a

hátszög növelésével nő, míg a fogsám növelésével csökken (2. táblázat).



8. ábra. Hátraesztérgálási méretek összehasonlítása

3.2. Tárcsamarók gyártási folyamata

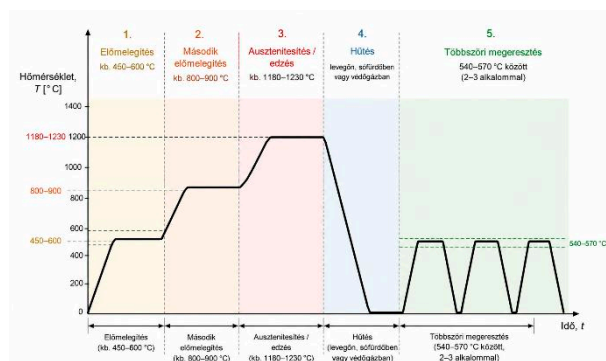
A tárcsamarók gyártása a megfelelő szerszámanyag kiválasztásával kezdődik, amely általában gyorsacél vagy keményfém. Az alapanyagból esztérgálással kialakítják a tárcsa külső és belső felületeit, valamint a szükséges méreteket és csatlakozó elemeket.

A profilos tárcsamarók esetében a hátfelület kialakítása rendszerint hátraesztérgálással történik, amelyhez speciális vezértárcsát alkalmaznak. A hátraesztérgálás célja, hogy az ismételt élezések során a szerszám profilja a lehető legkisebb mértékben változzon.

A geometriai kialakítás után a szerszámot hőkezelésnek vetik alá, amely biztosítja a szükséges keménységet és kopásállóságot.

Gyorsacél (HSS) tárcsamarók esetén a leggyakoribb hőkezelési eljárás (9. ábra):

1. Előmelegítés (kb. 450–600 °C)
2. Második előmelegítés (kb. 800–900 °C)
3. Ausztenítés / edzés (kb. 1180–1230 °C)
4. Hűtés (levegőn, sófürdőben vagy védőgázban)
5. Többszöri megeresztés (általában 2–3 alkalommal, 540–570 °C között)



9. ábra. Gyorsacél tárcsamaró hőkezelési ciklusa

A 9. ábrán az 1.3343 (HS6-5-2C, AISI M2) gyorsacélból készült tárcsamarók jellemző hőkezelési

ciklusa látható. Az anyag hőkezelése többlépcsős előmelegítést, 1180–1230 °C közötti ausztenítést, ezt követő intenzív hűtést, majd 550–570 °C körüli többszöri megeresztést foglal magában [15].

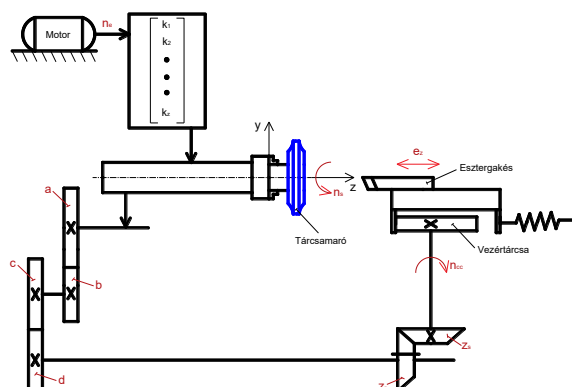
Keményfém tárcsamarók esetében a forgácsoló rész már a porkohászati gyártás során nyeri el végleges keménységét, ezért hagyományos edzést és megeresztést általában nem alkalmaznak.

A hőkezelést követően finomkösztörüléssel alakítják ki a végleges méreteket és az előírt élgeometriát.

Az utolsó műveletek közé tartozik az élezés, a minőségellenőrzés, valamint szükség esetén a felületbevonat (például TiN vagy TiAlN) felhordása, amely tovább növeli a szerszám élettartamát és forgácsolási teljesítményét.

4. A VEZÉRTÁRCSA ÉS A HÁTRAMUNKÁLÁSI GÖRBÉK SZEREPE

A tárcsamarók vágóéleinek megfelelő működéséhez elengedhetetlen a szükséges hátszög biztosítása, amely lehetővé teszi a szerszám és a megmunkált felület közötti súrlódás csökkentését, valamint a forgácsolóél kedvező forgácsolási viszonyainak fenntartását. A hátszög kialakítása hátramunkálással történik, amely során a fog hátfelülete a vágóél mögött meghatározott törvényszerűség szerint eltávolításra kerül. A hátramunkálás eredményeként a vágóél mögött olyan felület jön létre, amely biztosítja a szükséges szabadteret a forgácsolás és a forgács eltávolítás során [1, 5, 8].



10. ábra. Hátraesztérga gép elvi felépítése

A 10. ábrán látható, hogy a munkadarab egyenletes forgómozgást végez (n_z), mely fordulatszám a főhajtómű alapján beállítható [6]:

$$\begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_z \end{bmatrix} = n_e \cdot \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_z \end{bmatrix} \quad (19)$$

Ahol:

n_e – a villanymotor bemenő fordulatszáma [1/min],
 $n_1, n_2, \dots, n_z$ – a főhajtómű által biztosított főorsó fordulatszámok [1/min],

$k_1, k_2, \dots, k_z$ – a főhajtómű hajtóviszonyai.

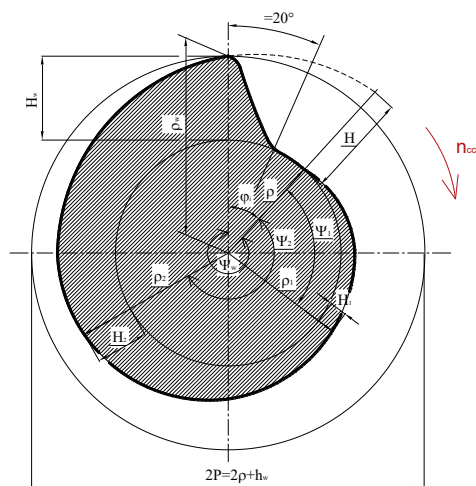
A hátramunkálás során a szerszám radiális mozgását a főorsóval merev kinematikai kapcsolatban álló vezértárcsa vezérli. A vezértárcsa profilja határozza meg a hátramunkáló mozgást és ezáltal a fog hátfelületén kialakuló hátramunkálási görbe alakját. A vezértárcsa geometriája közvetlenül befolyásolja a hátfelület kialakulását, a hátszög alakulását és a forgácsolóél működési jellemzőit [6].

A marószerszám hátraesztérgálásakor egy főorsófordulat alatt a szerszám valamennyi, z számú fogának hátramunkálását végre kell hajtani, ezért a vezértárcsa fordulatszámának a főorsóéhoz viszonyított arányát a fogszám határozza meg [6].

Ezt az áttételi viszonyt cserekerékrendszer segítségével állítják be. A főorsótól a vezértárcsáig terjedő kinematikai lánc egyenlete a következőképpen adható meg [6]:

$$n_s \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} \cdot \frac{z_r}{z_s} = n_{cc} \quad (20)$$

A hátramunkálási görbe alakja közvetlenül befolyásolja a hátszög alakulását. A görbe meredekségének változása a hátszög változását eredményezi, ami hatással van a szerszám kopására, a forgácsolási erőkre és az újraélezés utáni geometriai pontosságra. Ezért a vezértárcsa (11. ábra) profiljának és az általa létrehozott hátramunkálási görbének a vizsgálata alapvető fontosságú a tárcsamarók geometriai és élezési jellemzőinek értékelése során [1, 5, 8].



11. ábra. Vezértárcsa geometriai kialakítása

5. GEOMETRIAI ÉS ÉLEZÉSI JELLEMZŐK VIZSGÁLATÁNAK PROBLÉMÁI

A tárcsamarók forgácsolókéességét, éltartamát és profilpontosságát jelentősen befolyásolják a geometriai és élezési jellemzők. Vizsgálatukat nehezíti, hogy az ismételt élezések során a fogprofil és az élgeometria folyamatosan változik, ami módosítja a szerszám működési tulajdonságait. További problémát jelent a

hátramunkált hátfelület összetett geometriája, mivel a hátramunkálási görbe alakját a vezértárcsa profilja és a gép kinematikai viszonyai határozzák meg. Az élezés következtében a szerszám méretei és geometriai paraméterei is változnak, ezért szükséges a geometriai módosulások modellezése és elemzése. A pontos vizsgálathoz a vezértárcsa, a hátramunkálási görbék és az élezés hatására bekövetkező profilváltozások együttes figyelembevétele szükséges.

6. LEHETSÉGES VIZSGÁLATI ÉS MODELLEZÉSI IRÁNYOK

A tárcsamarók geometriai és élezési jellemzőinek pontosabb megismerése érdekében célszerű a hátramunkálási görbék matematikai és geometriai modellezése. A [16, 19, 20, 21] szakirodalmakban a logaritmikus és az archimédeszi spirál alkalmazását is vizsgálták hátramunkált alakos és fogazott marószerszámok kialakítására, amelyek igazolják a hátramunkálási görbe geometriai jelentőségét.

A vizsgálatok során elemezhető a vezértárcsa profiljának hatása a hátfelület alakjára, a hátszög változására, valamint az újraélezések során bekövetkező geometriai módosulásokra. A CAD-alapú tervezés és a numerikus szimuláció lehetőséget biztosít különböző szerszámgeometriák összehasonlítására és a geometriai paraméterek optimalizálására [17, 18].

További vizsgálati irányt jelenthet az újraélezések hatásának modellezése, valamint a hátramunkálási és köszörülési paraméterek kapcsolatának elemzése. A korszerű hátramunkáló köszörülési eljárások vizsgálatai alapján a köszörűkorong geometriája és a technológiai paraméterek egyaránt befolyásolják a kialakuló szerszámfelület tulajdonságait [19, 21].

7. KÖVETKEZTETÉSEK

A tárcsamarók geometriai és élezési jellemzőit alapvetően meghatározza a hátramunkálás módja és a hátramunkálási görbe alakja. A görbe geometriája közvetlenül befolyásolja a hátfelület kialakulását és a hátszög alakulását, ezáltal hatással van a szerszám forgácsolókéességére és újraélezhetőségére [16, 19, 20].

Napjainkban a marószerszámok hátfelületének kialakítása jellemzően CNC-vezérlésű gépekkel, valamint CAD- és szimulációs módszerekkel történik. Ezek lehetővé teszik az összetett szerszámgeometriák pontos tervezését és elemzését [17, 18].

A hagyományos hátraesztérgálás és vezértárcsás hátramunkálás elméletének ismerete ennek ellenére továbbra is fontos, mivel a korszerű szerszámtervezési és gyártási eljárások alapját ma is a klasszikus geometriai és kinematikai összefüggések képezik. A hátramunkálás vizsgálata ezért nemcsak történeti és oktatási szempontból jelentős, hanem a korszerű szerszámtervezés geometriai alapjainak megértéséhez is hozzájárul [17, 18, 21].

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány áttekintette a tárcsamarók geometriai és élezési jellemzőinek alakulását meghatározó főbb tényezőket, különös tekintettel a hátramunkálási folyamatra és a vezértárcsa szerepére. Bemutatásra került a hátraesztérgálás technikatörténeti fejlődése, valamint a tárcsamarók geometriai sajátosságai és azok kapcsolata a forgácsolási teljesítménnyel.

Az elemzés rámutatott arra, hogy a vezértárcsa geometriája alapvetően meghatározza a kialakuló hátramunkálási görbét, ezáltal a szerszám hátfelületének geometriáját, a hátszögviszonyokat és az utánélezhetőséget. A vizsgálat feltárta azokat a főbb problémaköröket, amelyek a szerszámprofil változásának, az élezések hatásának és a geometriai paraméterek meghatározásának elemzése során jelentkeznek.

Konkrét számadatokkal is végeztünk összehasonlító vizsgálatot archimédeszi és logaritmikus spirális hátfelületű marók esetére ugyanazon maróátmérő állandósága mellett.

A tanulmány eredményei megalapozták a tárcsamarók geometriai modellezésére és elemzésére irányuló további kutatásokat, amelyek hozzájárulhatnak a hátramunkálási folyamat pontosabb leírásához, valamint a szerszámok geometriai kialakításának és élezési technológiájának optimalizálásához.

8. SUMMARY

The study reviewed the main factors influencing the geometric and sharpening characteristics of disc milling cutters, with particular emphasis on the relieving process and the role of the control cam. The historical development of relieving technology was presented, along with the geometric characteristics of disc cutters and their relationship to cutting performance.

The analysis demonstrated that the geometry of the control cam fundamentally determines the resulting relieving curve and, consequently, the geometry of the cutter flank surface, the clearance angle conditions, and the regrindability of the tool. The study identified the major issues arising in the investigation of tool profile changes, the effects of repeated sharpening, and the determination of geometric parameters.

A comparative analysis using specific numerical data was also carried out for milling cutters with Archimedean and logarithmic spiral flank surfaces, while maintaining the same constant cutter diameter.

The results of the study provided a foundation for further research on the geometric modeling and analysis of disc milling cutters. Such investigations may contribute to a more accurate description of the relieving process and to the optimization of tool geometry design and sharpening technology.

9. IRODALOM

- [1] **Bakondi K.:** *Hátraesztérgált marók és fogazószerszámok tervezése*, BME, Tankönyvkiadó, Budapest, 1976, p. 240
- [2] <https://doi101.com/Lathe/chapter3.html> (letöltve: 2026. 06. 05.)
- [3] **Balzer, S. M.:** *Device for Making Cutters*. U.S. Patent No. 535127, United States Patent Office, Washington, D.C., USA, 1895. Bejelentés: 1894. május 14., megadás: 1895. március 5.
- [4] **RusNC:** *Frezervanie kulachkov s profilem po arkhimedovoj spirali*. Elérhető:

- <https://rusnc.ru/poleznoe/frezerovanie-kulachkov-s-profilem-po-arkhimedovoj-spirali/> (letöltve: 2026. 06. 05.)
- [5] **Gorski, E.:** *Alakos megmunkálószerszámok, kések, üregelőtűrkék, marók*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976, p. 315, ISBN 963 10 1182 8
- [6] **Takács, E.:** *Szerszámgépek II.*, Nehézipari Műszaki Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Tankönyvkiadó, Budapest, 1983, p. 84.
- [7] <https://www.lathes.co.uk/feinpruf-lathe/> (letöltve: 2026. 06. 13.)
- [8] **Dudás I.:** *Gépgyártástechnológia III., A. Megmunkáló eljárások és szerszámok. B. Fogazott alkatrészek gyártása és szerszámaik* Egyetemi tankönyv., Műszaki Kiadó, 2011., p. 538, ISBN 978-963-16-6531-4
- [9] **Brown, J. R.:** *Improvement in Universal Milling-Machines*. U.S. Patent, United States Patent Office, Washington, D.C., USA, 1865.
- [10] **Brown, J. R.:** *Improvement in Grinding-Machines*. U.S. Patent No. 187770, United States Patent Office, Washington, D.C., USA, 1877. Megadás: 1877. február 27.
- [11] **Mehta, N. K.:** *Metal Cutting and Design of Cutting Tools, Jigs & Fixtures*. McGraw Hill Education (India) Private Limited, New Delhi, India, 2015.
- [12] **Donaldson, C., LeCain, G. H., Goold, V. C.:** *Tool Design*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, India.
- [13] **Bhattacharyya, A.:** *Metal Cutting: Theory and Practice*. New Central Book Agency (P) Ltd., Calcutta, India, 1984.
- [14] **Society of Manufacturing Engineers:** *Fundamentals of Tool Design*. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, USA.
- [15] **Dörrenberg Edelstahl GmbH:** *Material No. 1.3343, HS6-5-2C (DMO5) – High-Speed Steel, Material Data Sheet*. Dörrenberg Edelstahl GmbH, Engelskirchen, Germany, 2024.
- [16] **Xu, X. X., Zhang, X. H., Zheng, Y. Y.:** *Logarithmic Spiral and its Application to the Design of the Relieving Shaped Milling Cutter*. Applied Mechanics and Materials, Vol. 42, pp. 396–399, 2010. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.42.396
- [17] **Khan, M. R., Tandon, P.:** *Computer-Aided Design and Analysis of a Custom-Engineered Form Milling Cutter*. Computer-Aided Design and Applications, Vol. 7, No. 2, pp. 213–219, 2010. DOI: 10.3722/cadaps.2010.213-219.
- [18] **Lee, S. W., Nestler, A.:** *Simulation-aided Design of Thread Milling Cutter*. Procedia CIRP, Vol. 1, pp. 120–125, 2012. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.019
- [19] **Nguyen, H. K., Dong, P. V., Tran, V. Q.:** *Investigation of Influence of Grinding Wheel and Cutting Parameters on Surface Roughness and Surface Hardening when Relieving Grinding the Gear Milling Teeth Surface Based on the Archimedes' Spiral*. International Journal of Metrology and Quality Engineering, Vol. 14, Article 1, 2023. DOI: 10.1051/ijmqe/2022016
- [20] **Gyéresi, H. A., Cristea, L., Máté, M.:** *The Improvement of the Precision of the Archimedean Spiral Toothline Gear Cutting Mill*. Papers on Technical Science, Vol. 14, pp. 23–29, 2021. DOI: 10.33894/mtk-2021.14.04
- [21] **Malkov, O. V., Pavlyuchenkov, I. A.:** *Relieving of Thread Milling Cutter Teeth Using a Grinding Wheel with a General Position Axis*. Russian Engineering Research, Vol. 45, No. 2, pp. 205–213, 2025. DOI: 10.3103/S1068798X25020136

FDM NYOMTATÁS GEOMETRIAI PONTOSSÁGA - A CAD MODELLTŐL A VALÓSÁGIG

GEOMETRIC ACCURACY OF FDM PRINTING - FROM CAD MODEL TO REALITY

Garay Richárd*, Nemes Dániel**

ABSTRACT

This research provides a comprehensive statistical model of the geometric accuracy and surface roughness of parts manufactured using FDM (Fused Deposition Modeling) technology. Additive manufacturing today is no longer limited to prototyping, the technology is now used to produce parts in mass production, making an understanding of manufacturing variations essential for establishing reliable tolerance limits. Data was collected using various measurement techniques, including digital calipers, micrometers, structured light 3D scanning, and a roughness tester. The study characterizes deviations from nominal CAD values across different size categories using statistical indicators. The final result provides a framework for the maximum tolerance limits recommended based on ISO 286 IT classes, which is specifically tailored to the parameters of the FDM process under investigation.

Ez a kutatás átfogó statisztikai modellezést nyújt az FDM (Fused Deposition Modeling) technológiával gyártott alkatrészek geometriai pontosságáról és felületi érdességéről. Az additív gyártás napjainkban már nem csak a prototípus-készítésről szól, hanem a technológiával már sorozatgyártott alkatrészeket is gyártanak, így a gyártás során keletkező eltérések megértése elengedhetetlen a megbízható tűréshatárok megállapításához. Az adatokat többféle mérési technikával gyűjtöttük, többek között digitális tolómérővel, mikrométerrel, strukturált fényű 3D-szkenneléssel és érdességmérővel. A tanulmány különböző méretkategóriákban statisztikai mutatók segítségével jellemzi a névleges CAD-értékektől való eltéréseket. A végső eredmény egy keretrendszert biztosít az ISO 286 IT osztályok alapján ajánlott maximális tűréshatárokhoz, amely kifejezetten a vizsgált FDM-folyamat paramétereire van szabva.

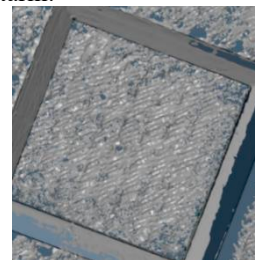
1. BEVEZETÉS

A 3D-nyomtatás történeti fejlődése 1984-ben kezdődött, amikor Charles W. Hull kifejlesztette a sztereolitográfiát (SLA), amelyet hamarosan a fűzős réteges modellezés (FDM) és a szelektív lézeres szinterezés (SLS) követett. [2] Ma ezek a technológiák

elengedhetetlenek az autópiparban, a repülőgépiparban, a gyógyszeriparban és a divatiparban. Az orvosi és fogászati területeken a 3D nyomtatás lehetővé teszi egyedi sebészeti implantátumok és protézisek készítését, bár ezek az alkalmazások jelentős akadályokkal szembesülnek a méretpontosság és a felületi minőség tekintetében. [4, 5, 6, 7, 8, 12] Az FDM 3D-nyomtatási eljárás, jelenleg a legelterjedtebb és egyik legolcsóbb megoldásnak számít egyedi és kisszériás gyártásban. A nyomtató által használt nyersanyag egy huzal alakú, hőre lágyuló műanyag szál, amit egy fűvókán keresztül tol ki a nyomtató és a tárgyasztalra rétegz, ahol megszilárdul, és elkészül az alkatrész. A huzal adagolási sebessége, az asztal mozgási sebessége, valamint a huzaladagoló és az asztal hőmérséklete változtatható. Ezzel a technológiával sokféle nagy teherbírású műanyag termék állítható elő, például PA (nejlon), PC, PEEK stb. [9, 10, 11]

2. ELŐKÉSZÜLETEK

A vizsgált próbatestet elkészítéséhez az Ultimaker 3 nyomtatót használtuk. Az összes beállítást alapértelmezett értékén hagytuk, kivéve a rétegmagasságot, amelyet 0,1 mm-re, és a kitöltést, amelyet 37%-ra állítottunk be. A támasztóanyag típusát „tree”-re állítottuk. [13] Az FDM technológiára jellemző rétegvastagság előre meghatározza a pontosság határát, így a kutatás csak az adott nyomtató, beállítások és anyag kombinációra érvényes. Fontos megjegyezni azt is, hogy a használt geometria alsó részét nem mértük, mivel a támaszanyag eltávolítása, befolyásolja a méreteket, így félrevezető mérési eredményekhez vezetett volna (1. ábra). Továbbá a támasztékok méretre gyakorolt hatását csak ennél összetettebb vizsgálatokkal lehetett volna feltárni.

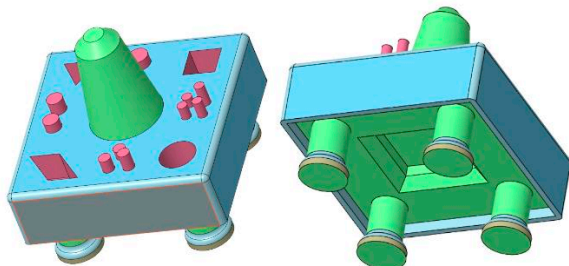


1. ábra Az asztal alja; a 3D szkennelt képen jól láthatók a támaszanyag maradványai

* tanszéki mérnök, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék

** tanársegéd, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék

A kutatás előkészítéseként konkrét mérési célokat határoztunk meg. Keresést végeztünk a tanulmányhoz hasonló publikációk után, és az azokban használt geometriákat felhasználva kidolgoztunk egy kritériumrendszert, amely alapján a saját geometriánk is létrehozható volt. Végül négy publikációt használtunk fel e kritériumok megállapításához. A saját geometriánk a 2. ábrán látható. [8, 14, 15, 16]

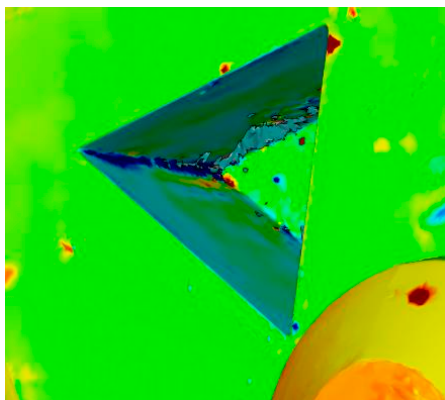


2. ábra A tanulmányhoz használt geometria

3. A MÉRÉS FOLYAMATA ÉS MÓDSZEREK

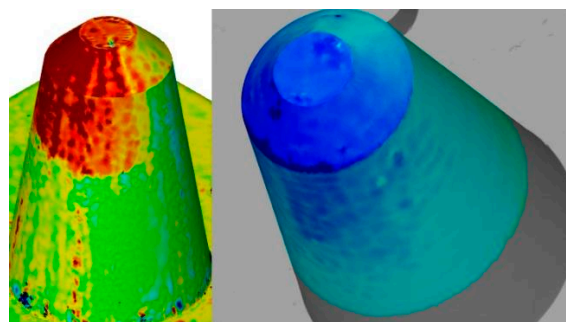
A mérésekhez négy különböző mérőeszközt használtunk: digitális tolómérőt, digitális mikrométert, érdességmérőt és 3D szkennert. A kutatás során használt legfontosabb mérőeszköz a 3D szkennert volt. Ez a műszer lehetővé tette a nyomtatott tárgy és a CAD-modell összehasonlítását. A mérések során a GOM Atos Core 200-as 3D szkennert használtuk. [17, 18]

Összetett geometriák vagy mély, keskeny mélyedések esetén az optikai hozzáférhetőség korlátozott, mivel a szkennert által rávetített fény és a kamera látószöge nem éri el ezeket a területeket. A kutatás során előfordultak olyan esetek, amikor a szkennert nem látott be a tárgy zsebeibe, ezért azt a területet többször kellett szkennelni. A mattító spray javított a helyzeten, de ennek ellenére a modell bizonyos területeken továbbra is hiányos maradt (3. ábra). A vetett árnyékok szintén problémásak lehetnek, mivel a kiemelkedések vagy élek árnyékot vethetnek az objektum egyes részeire, megakadályozva a szkennert a megfelelő képalkotásban. Ilyen esetekben a több szögből történő szkennelés jelent megoldást. [19, 20]



3. ábra A szkennert többszöri beolvasás után sem tudta felismerni a háromszög alsó éleit

A kutatás során egy új probléma is felmerült. A próbatest közepén található nagy kúp tetején jelentős eltérés mutatkozott a CAD-modelltől, és a hiba jellege eleinte nem volt egyértelmű (4. ábra). Számos lehetséges okot vizsgáltunk át szisztematikusan, végül rájöttünk, hogy a korábban említett zsebek beolvasásakor bizonyos pozíciókban jelentősen nagyobb expozíciós időket alkalmaztunk, mint más esetekben. Következésképpen a poligonizálás előtt alkalmazott adatszűrő algoritmus a nagyobb pontsűrűségű területeket másképp súlyozta, mint a többi régiót, így a különböző szakaszokban alkalmazott eltérő expozíciós idők okozhatták az eltérést.

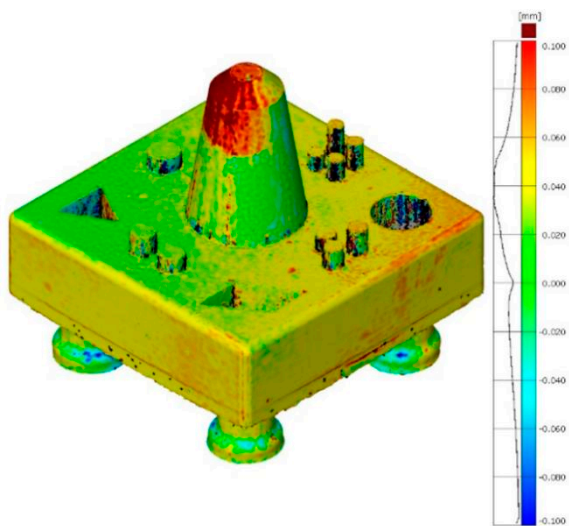


4. ábra Jelentős eltérés a próbatest kúpjának tetején

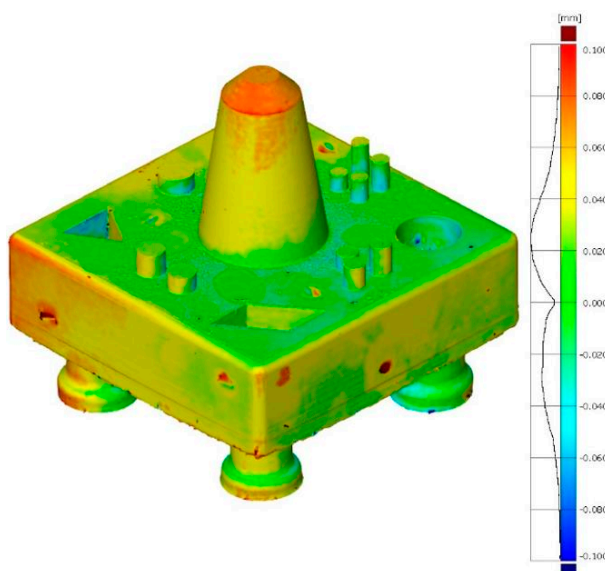
A vizsgált tárgyról mattító spray használatával, illetve anélkül is készítettünk felvételeket, a méréseket minden esetben kétszer ismételtük meg. Az 5. ábrán látható, hogy a beszkennt tárgy felülete mattító spray nélkül lényegesen zajosabb. Az is nyilvánvaló, hogy a kis hengerek és zsebek gyakran nagyon magas hibaértékeket mutattak. Ez azért történt, mert a szkennert nem tudta megfelelően beszkenntelni ezeket a zsebeket és hengereket.

Az előző szkenneléshez képest a 6. ábra azt mutatja, hogy a mattító spray alkalmazása sokkal simábbá tette a szkennelt tárgy felületét. A szkennert sokkal hatékonyabban észlelte a zsebeket és a kis hengereket, ami egy jobban használható modellt eredményezett. A várakozásoknak megfelelően, a mattító spray-vel készült beolvasások sokkal részletesebbek, simábbak és kevésbé voltak zajosak, mint azok, amelyeket anélkül készítettünk.

A spray-t azonban óvatosan kell alkalmazni, mivel a nagy kúp körül megjelenő kékes, pontszerű leképezési hibákat a spray okozta. Használat közben ugyanis a spray kis csomókba állhat össze.



5. ábra Mattító spray használata nélkül készített szkennelés



6. ábra Mattító spray használatával készített szkennelés

A kutatás limitációja, hogy egyetlen próbatesten végeztük el a méréseket, illetve egyetlen nyomtatóval és anyaggal készítettük el a testet. Ezt a limitációit úgymond kompenzálja az elvégzett mérések mennyisége.

4. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

A kézi mérések eredményeit méretcsoportokba soroltuk a pontosság alakulásának feltárása érdekében (1. táblázat). Összesen 292 mérés alapján egyértelmű fordított arányosság mutatkozott az alkatrész mérete és a relatív eltérés között. Megállapítottuk, hogy a szórás egyenesen arányos a méret abszolút értékével, ami 0,045 és 0,216 között mozog.

1. táblázat A méretcsoportok elemzésének eredményei

Méret-csoportok [mm]	Eltérés a névlegestől [mm]	Relatív eltérés [%]	Relatív eltérés abszolútértéken [%]	Szórás
3-6	0,0841	1,410	1,957	0,045
7-10	0,0815	0,543	0,916	0,056
11-14	0,1450	1,107	1,107	0,062
15-20	0,0769	0,004	0,482	0,063
21-40	0,1335	-0,516	0,521	0,144
41-100	0,2358	0,077	0,389	0,216

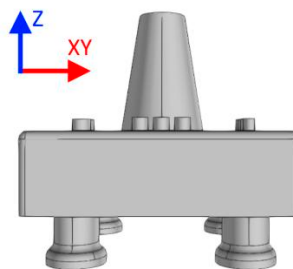
A nyers adatok feldolgozása után a kapott 3D modelleket szoftveres környezetben vetettük össze a névleges CAD modellel a geometriai pontosság ellenőrzéséhez. A vizsgálat során összesen 58 ponton végeztünk el 232 mérést, különös tekintettel a hengerességre, a párhuzamosságra és a síklapúságra.

Az elemzés kimutatta, hogy a szkennelések átlagos relatív eltérése 0,21 mm. Az összesített eredmények számszerűsítették a korábbi megfigyeléseket: a mattító spray használata nemcsak vizuálisan, hanem mérhetően is javította a pontosságot, közel 34%-os eltérést mutatva a spray-vel kezelt és a kezeletlen felületek adatai között.

A különböző nyomtatási irányokat külön táblázatokban is összehasonlítottuk. Az 7. ábrán láthatóak a nyomtatási irányok, a 2. táblázatban pedig a Z irány, és a XY irány eredményei.

2. táblázat Nyomtatási irányok összehasonlítása

3D szkennelés eredmények		
Nyomtatási irány	Relatív eltérés [mm]	Szórás
XY	0,158	0,123
Z	0,138	0,101
Kézi mérések eredményei		
Nyomtatási irány	Relatív eltérés [mm]	Szórás
XY	0,116	0,028
Z	0,019	0,134



7. ábra Nyomtatási irányok

A geometrián felületi érdességmérést is végeztünk. A mérésekhez a QPT Smartic M mérőműszert használtunk. A nyomtatott mintadarab felületi érdessége gyakran már szemrevételezéssel is észlelhető. Az összefoglalt eredmények alapján a mért pontok Ra-értéke 7,729 μm , az Rz-értéke pedig 36,755 μm .

Ez jelentősen érdesebbnek tekinthető, mint a hagyományos gyártási technológiákkal kapott értékek. Ennek a jelenségnek az oka az FDM technológiával előállított minták réteges szerkezetében keresendő. Az egymásra rakódó rétegek között a rétegvonalak mentén úgynevezett „lépcsőzetes hatás” jelentkezik, amely jelentős eltéréseket okozhat az érdességmérés során, és jelentősen növelheti a felületi egyenetlenségeket. A ferde felületeken és a kis keresztmetszetű rétegeknél a lépcsőzetes hatás mind vizuálisan, mind a mérési adatokban jobban látható, ami magyarázza az ezeken a felületeken kapott magasabb Ra- és Rz-értékeket. Az FDM további jellemzői, mint például az extrudálási hőmérséklet és sebesség enyhe ingadozásai, vagy a kis keresztmetszetű rétegek rövid hűlési ideje tovább növelhetik a helyi érdességet. [2, 3]

A kísérleti eredmények azt mutatják, hogy az FDM nyomtatókkal előállított tárgyak felületi minősége utómunkálatok nélkül jelenleg nem érheti utol a fröccsöntéssel gyártott tárgyak és alkatrészek felületi érdességét, hanem sokkal inkább a homoköntéssel vagy a nagyoló forgácsolással előállított felületek érdességével tekinthető ekvivalensnek. [2, 3, 9, 16]

5. EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A kutatás célja az ajánlott tűréshatárok meghatározása volt. Ebben a fejezetben összefoglaltuk a mért adatokat, és az IT-osztályok alapján meghatároztuk a különböző méretcsoportokra vonatkozó ajánlott tűréshatárokat. Ez lényegében közel 700 mérésen alapuló iránymutatást nyújt a kutatásban vizsgált esetre vonatkozóan. Ezeket az eredményeket a korábban említett korlátozások figyelembevételével kell értelmezni és alkalmazni. Az ajánlott tűréshatárokat az ISO 286 szabványban meghatározott méretek alapján határoztuk meg. [21, 22, 23, 24]

3. táblázat Z és XY irányú méretek ajánlott tűrései

Névl. méret [mm]	M (Z)	Tűrés (Z)	M (XY)	Tűrés (XY)
≤ 3	n.d.	n.d.	136.3	IT14
$< 3 \leq 6$	-100	b14	42.5	za12
$< 6 \leq 10$	-88.75	c13	109.8	zc11
$< 10 \leq 18$	47.5	x10	41.25	u13
$< 18 \leq 30$	-20	f9	-171.9	b11
$< 30 \leq 50$	n.d.	n.d.	47.5	t14
$< 50 \leq 120$	n.d.	n.d.	-171.3	c12
Felületi hengerek	2.5	m11	108.8	zb13
Hengeresség	347.5	za13	n.d.	n.d.
Párhuzamosság	228	y10	n.d.	n.d.
Síklapúság	152.5	v10	280	z11
Érdesség	10.95	IT11	5.12	IT8

Az 3. táblázatban összefoglaltuk a Z és az XY irányra vonatkozó átlagértékeket és a végleges ajánlott tűréshatárokat. Ezek az adatok azt mutatják, hogy egyes esetekben az XY irányra szűkebb tűréshatárokat lehetett megadni, mint a Z irányra. Kisebb méretek esetén az XY irányú méretek tűréshatárai néha két IT-osztállyal szűkebbek, mint a Z irányban. A felületi érdesség tekintetében a különbség három IT-osztályt tesz ki: az XY irányú felület (IT8) sokkal simábbnak bizonyult, mint a Z irányú (IT11). Ez ellentétben állhat a várt eredménnyel, mivel a Z irány volt a nyomtatási irány. A jelenség magyarázata azonban a nyomtató mechanikai felépítésében keresendő. Az XY síkban a szíjhajtás és a léptetőmotorok felbontása gyakran finomabb pozicionálást tesz lehetővé, mint a Z tengelyt mozgó menetes orsó esetleges holtjátéka vagy pontatlansága. Emellett a Z irányú méretpontosságot befolyásolja a rétegek egymásra rakódásából adódó halmozott hiba, valamint a hűlés közbeni vertikális zsugorodás is, ami az XY irányú, rögzített asztalon történő rétegfelhordásnál kevésbé kritikus. [2, 3, 8, 15]

Ez az összefoglaló táblázat kiváló útmutatást nyújt azok számára, akik FDM eljárással kívánnak nyomtatni, a kutatásban alkalmazott beállításokkal. A táblázat alapján előre meghatározhatók a gyártás során alkalmazandó tűréshatárok. Természetesen számos további kutatási lehetőség kínálkozik ezen a területen. Például több mintát is kinyomtathatunk azonos beállításokkal, vagy más beállításokkal és különböző típusú nyomtatókkal. Ezek a variációk rengeteg további mérési adatot eredményezhetnek. Megvizsgálható a rétegvastagság, a kitöltési arány, a nyomtatási sebesség és a hőmérséklet statisztikai hatása is. Ezenkívül más anyagokat is felhasználhatunk és összehasonlíthatunk.

A kutatással kapcsolatos további részletek az [1] cikkben vannak publikálva.

6. SUMMARY

The aim of the research was to determine the recommended tolerance limits. In this chapter, the measured data were summarized, and the recommended tolerances for various size ranges were established based on IT grades. This essentially provides a guideline based on nearly 700 measurements for the specific case investigated in this study. These results should be interpreted and applied considering the previously mentioned limitations. The recommended tolerance limits were determined based on the dimensions specified in the ISO 286 standard. [21, 22, 23, 24]

Table 3. Recommended tolerances for dimensions in the Z and XY directions

Nominal size [mm]	M (Z)	Tolerance (Z)	M (XY)	Tolerance (XY)
≤ 3	n.d.	n.d.	136.3	IT14
< 3 ≤ 6	-100	b14	42.5	za12
< 6 ≤ 10	-88.75	c13	109.8	zc11
< 10 ≤ 18	47.5	x10	41.25	u13
< 18 ≤ 30	-20	f9	-171.9	b11
< 30 ≤ 50	n.d.	n.d.	47.5	t14
< 50 ≤ 120	n.d.	n.d.	-171.3	c12
Surface cylinders	2.5	m11	108.8	zb13
Cylindricity	347.5	za13	n.d.	n.d.
Parallelism	228	y10	n.d.	n.d.
Flatness	152.5	v10	280	z11
Hardness	10.95	IT11	5.12	IT8

Table 3 summarizes the average values and the final recommended tolerance limits for the Z and XY directions. These data indicate that, in certain cases, tighter tolerance limits could be specified for the XY direction than for the Z direction. For smaller dimensions, the tolerances in the XY direction are sometimes two IT grades tighter than in the Z direction. Regarding surface roughness, the difference amounts to three IT grades: the XY-direction surface (IT8) proved to be significantly smoother than the Z-direction surface (IT11). This may contradict expected results, as Z was the build (printing) direction. However, the explanation for this phenomenon lies in the mechanical construction of the printer. In the XY plane, the resolution of the belt drive and stepper motors often allows for finer positioning than the potential backlash or inaccuracy of the leadscrew driving the Z-axis. Furthermore, dimensional accuracy in the Z direction is affected by cumulative errors resulting from layer stacking, as well as vertical shrinkage during cooling, which is less critical during layer deposition in the XY direction on a fixed print bed. [2, 3, 8, 15]

This summary table provides excellent guidance for those intending to print using the FDM process with the settings applied in this research. Based on the table, the tolerance limits to be applied during manufacturing can be predetermined. Naturally, numerous further research opportunities exist in this field. For instance, more samples could be printed using the same parameters, or with different settings and various types of printers. These variations could yield a wealth of additional measurement data. The statistical effects of layer thickness, infill density, printing speed, and temperature could also be investigated. Additionally, other materials could be utilized and compared. Further details regarding the research are published in article [1].

7. IRODALOM

[1] GARAY R., NEMES D.: *Statistical modeling of geometric accuracy of FDM printing for machine design applications*, 11th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME), publikálásra elfogadva

[2] HORVATH J.: *Mastering 3D Printing*, Springer, 2014, <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-0025-4>

[3] HORVATH J., CAMERON R.: *Mastering 3D Printing: A Guide to Modeling, Printing, and Prototyping*, Apress, 2020, <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5842-2>

[4] YAP Y. L., YEONG W. Y.: *Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review*, Virtual and Physical Prototyping, Vol. 9, No. 3, 2014, pp. 195–201, <https://doi.org/10.1080/17452759.2014.938993>

[5] LIAW C. Y., GUVENDIREN M.: *Current and emerging applications of 3D printing in medicine*, Biofabrication, Vol. 9, No. 2, 2017, 024102, <https://doi.org/10.1088/1758-5090/aa7279>

[6] BHADURI S., TOVAR J., KANE S.: *Fabrication Games: Using 3D Printers to Explore New Interactions for Tabletop Games*, 2017, pp. 51–62, <https://doi.org/10.1145/3059454.3059463>

[7] YANG F., ZHANG M., BHANDARI B.: *Recent Development in 3D Food Printing*, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1094732>

[8] WEI X., ZHANG S., SUN L., ZHAO X., SUN M., YU R., ZHOU X., LI Y.: *Geometric Accuracy and Dimensional Precision in 3D Printing-Based Gear Manufacturing: A Study on Interchangeability and Forming Precision*, Polymers, Vol. 17, No. 3, 2025, 416, <https://doi.org/10.3390/polym17030416>

[9] BORBÁS L.: *Felépítés elvű (additív) gyártástechnológiák a gépészetben*, Magyar Mérnöki Kamara, Gépészeti Tagozat, Budapest, 2017.

[10] DOSHI M., MAHALE A., SINGH S., DESHMUKH S.: *Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects*, Materials Today: Proceedings, Vol. 50, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.003>

[11] PRUSA J.: *Basics of 3D Printing with Josef Prusa*, Prusa Research, 2019.

[12] SHAIKH S., NAHAR P., SHAIKH S. Y., SAYED A. J. és HABIBULLAH M. A.: *Current perspectives of 3D printing in dental applications*, Braz. Dent. Sci., Vol. 24, No. 3, 2021, <https://doi.org/10.14295/bds.2021.v24i3.2481>

[13] ULTIMAKER: *Ultimaker 3 – Felhasználói kézikönyv (v1.0)*, Magyar nyelvű kiadás, 2025, <https://um-support-files.ultimaker.com/manuals/user-manual/UM3/Ultimaker%203%20-%20User%20manual%20HU%20v1.0.pdf>

[14] RUPAL B. S.: *Geometric Tolerance Quantification and Prediction Framework for Additive Manufacturing Processes*, University of Alberta, 2021, <https://doi.org/10.7939/r3-a21v-yp34>

[15] AGARWAL K., SHUBHAM P., BHATIA D., SHARMA P., VAID H., VAJPEYI R.: *Analyzing*

- the Impact of Print Parameters on Dimensional Variation of ABS specimens printed using Fused Deposition Modelling (FDM)*, Sensors International, Vol. 3, 100149, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100149>
- [16] REBAIOLI L., FASSI I.: *A review on benchmark artifacts for evaluating the geometrical performance of additive manufacturing processes*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 93, 2017, <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0570-0>
- [17] POLLÁK M., SABOL D., GORYL K.: *Measuring the Dimension Accuracy of Products Created by 3D Printing Technology with the Designed Measuring System*, Machines, Vol. 12, No. 12, 2024, 884, <https://doi.org/10.3390/machines12120884>
- [18] GOM GMBH: *ATOS Core 3D Scanner – Product Brochure*, 2025, https://scanare3d.com/wp-content/uploads/2020/07/GOM_Brochure_ATOS_Core_EN.pdf
- [19] RACHAKONDA P., MURALIKRISHNAN B., SAWYER D.: *Sources of Errors in Structured Light 3D Scanners*, SPIE Defense and Commercial Sensing 2019, Baltimore, MD, US, 2019, https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=927473
- [20] ONYIA T., OLARINOYE I.: *Advancements and Challenges in 3D Scanning: A Comprehensive Review of Engineering Applications*, African Journal of Advances in Science and Technology Research, Vol. 18, 2025, pp. 191–206, <https://doi.org/10.62154/ajastr.2025.018.010640>
- [21] ISO 286-1:2010: *Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits*, 2010.
- [22] ISO 286-2:2010: *Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations*, 2010.
- [23] BOÓR F.: *Gyártási tűrések elemzése és kapcsolata a folyamatszabályozással*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2019, ISBN 978-963-454-340-4.
- [24] HÁROMI F., KOVÁCSNÉ G.: *Gépszerkezetek I.*, Universitas-Győr Nonprofit Kft., Győr.

EFFEKTÍV MECHANIKAI JELLEMZŐK MEGHATÁROZÁSA RÖGZÍTETT PARAMÉTEREKSEL NYOMTATOTT FDM STRUKTÚRÁKHOZ

DETERMINATION OF EFFECTIVE MECHANICAL PROPERTIES FOR FDM STRUCTURES PRINTED WITH FIXED PARAMETERS

Técsi Máté*, Nemes Dániel**

ABSTRACT

In engineering practice, one of the most important questions in design and analysis is how a given material will behave under different loads. This is predicted using material models, or effective mechanical properties. In reality, the physical properties of materials are extremely complex, and many factors – such as material structure, temperature, loading rate or pre-stressing – can affect their mechanical response. Choosing the right material model, or effective mechanical properties is crucial during the engineering design process, as the accuracy of the model directly affects the reliability of simulations, the safety of structures, and the cost-effectiveness of manufacturing. In this research, we created a transversely isotropic effective material model for FDM 3D printed specimens with given technological and geometric parameters.

A mérnöki gyakorlatban, a tervezés és elemzés egyik legfontosabb kérdése, hogy egy adott anyag miként viselkedik különböző terhelések hatására. Ennek előrejelzése az anyagmodellek, vagy effektív mechanikai jellemzők segítségével valósul meg. A valóságban az anyagok fizikai tulajdonságai rendkívül összetettek, számos tényező – például az anyagszerkezet, a hőmérséklet, a terhelés sebessége vagy az előzetes igénybevétel – befolyásolhatja azok mechanikai válaszát. A megfelelő anyagmodell, vagy effektív mechanikai jellemző kiválasztása kulcsfontosságú a mérnöki tervezési folyamatok során, mivel a modell pontossága közvetlenül befolyásolja a szimulációk megbízhatóságát, a szerkezetek biztonságát, valamint a gyártás költséghatékonyságát. Jelen kutatásban FDM 3D nyomtatott próbatestek transzverzálisan izotróp effektív anyagmodellt határoztuk meg adott technológiai és geometriai paraméterek mellett.

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt években az FDM 3D nyomtatási technológia alkalmazási köre jelentősen kibővült,

manapság az iparban és az orvostudományban is előszeretettel alkalmazzák főként gyors prototípus gyártásra. Azonban az ezzel az eljárással előállított tárgyak anyagtulajdonságai az irányfüggő tulajdonságok és a gyártási paraméterek (mint például a rétegvastagság, nyomtatási hőmérséklet vagy a nyomtatási sebesség) miatt jelentősen eltérnek egymástól. Ez hangsúlyozza annak fontosságát, hogy rögzített gyártási paraméterek mellett is elengedhetetlen a pontos és megbízható anyagmodell meghatározása, amely megalapozza a numerikus szimulációk és modellezések hitelességét.

Ezen cikk témája a szakdolgozatomat dolgozza fel, amely a Debreceni Egyetem Gépészmérnöki Tanszékéről származik, melyet a 3D nyomtatott alkatrészek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata ihletett. A kutatómunka végső célja egy transzverzálisan izotróp effektív anyagmodell meghatározása volt, FDM 3D nyomtatási eljárás alkalmazásakor. Ezen felül a kutatás során tömeg, valamint geometriai pontosság mérés is sorra került, amely elősegíti a kapott eredmények megértését, valamint a mérési anomáliák elkerülését. A kutatásban cél volt szűkebb körű, de alapos vizsgálat volt. Ennek köszönhetően több limitáció volt szükséges, mely részletesen később lesz tárgyalva. A témában alapműnek számító [5-7] könyvek részletesen tárgyalják az anyagok különböző karakterizációs lehetőségeit, az azokhoz szükséges mérési elveket, valamint azok előnyeit és hátrányait. Ezekben megtalálható a kutatás alapjául szolgáló transzverzálisan izotróp anyagmodell általános Hook törvénye is, mely az alábbi formában néz ki.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{yz}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

* BSc hallgató, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék

** tanársegéd, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék

2. EFFEKTÍV ANYAGMODELL MEGHATÁROZÁSA

2.1. Kísérletterv

A 1. táblázatban szereplő adatok definiálják a kísérlettervet. Ennek meghatározása során részben hasonló tanulmányok eredményei [1-3] is figyelembe lett véve. Továbbá kiemelten fontos volt az eredmények összehasonlíthatósága más nyomtatókkal, ezért a paramétereket úgy kellett meghatározni, hogy egy másik tanszéki FDM 3D nyomtatóval is reprodukálható legyen a próbatetek előállítása. Ez azért kulcsfontosságú, mert a Markforged Mark Two nyomtató zárt rendszerű szelvényének (Eiger) javasolt beállításait szerettük volna reprodukálni. Mivel a Cura szelvényezőszoftver kiterjedt paraméterbeállításokat tesz lehetővé, így könnyen össze lehetett hangolni a szoftvereket.

A kutatásban három orientációban kerültek a próbatetek kinyomtatásra. A laposan nyomtatott próbateteket XY irányú, az élén nyomtatottakat YZ, míg a függőleges irányban legyártott próbateteket ZX irányú próbateteknek lettek elnevezve. A próbatetek csak a nyomtatási irányokban térnek el egymástól, a többi paraméter kivétel nélkül megegyezik minden próbatetnél. A kísérletterv részleteit az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat: Kísérletterv

Szabvány	ISO 527-2_1A		
Alapanyag	Ultimaker Nylon		
Próbatestek	XY (lapján)	YZ (élén)	ZX (állítva)
Darabszám	5	5	5
Húzási sebesség	50 mm/perc		
Nyomtatási paraméterek			
Rétegvastagság	0,1 mm		
Kitöltöttség	37%		
Nyomtatási hőmérséklet	250 °C		
Ágy hőmérséklete	40 °C		
Nyomtatási irány	XY	YZ	ZX
Nyomtatási sebesség	70 mm/s		
Kitöltés mintázata	Háromszög		
Fúvóka átmérő	0,4 mm		
Felhasznált eszközök			
Nyomtató	Ultimaker 3		
Mérleg	Ohaus Navigator NV622		
Mikrométer	Mitutoyo 0-25		
Vizsgáló gép	INSTRON 68TM-10 egy tengelyű anyagvizsgáló gép		
Kiértékelő szoftver	Bluehill Universal		
Nyúlásmérő	Ave 2		

2.2. Mérések és limitációk

A PA higroszkóp tulajdonsága miatt hajlamos felvenni a levegő páratartalmát és a molekulalánckokba beépülve ez rontja a szilárdságát. Ez a próbatetek eltérő gyártási időpontja, de azonos szakítóvizsgálat időpontja miatt a levegő expozíciója eltérő, ami nagy nedvességfelvétel esetén expozíció indukált eltéréseket okozhat a próbatetekben. A nedvességfelvétel mértékét egy gyakorlatban bevett egyszerűsített mérési eljárással, a tömegméréssel követtük nyomon.

Ezt követően, az egyes próbatetek szélessége és vastagsága lett lemerve. A mérések egyetlen alkalommal lettek elvégezve, és minden próbatest vastagsága és szélessége három helyen lett lemerve. Ezzel a méréssel a nyomtatási pontosság vizsgálata volt a cél.

Végezetül, a szakítóvizsgálati mérések elvégzése következtet, melynek körülményeit a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A szakítóvizsgálat körülményei

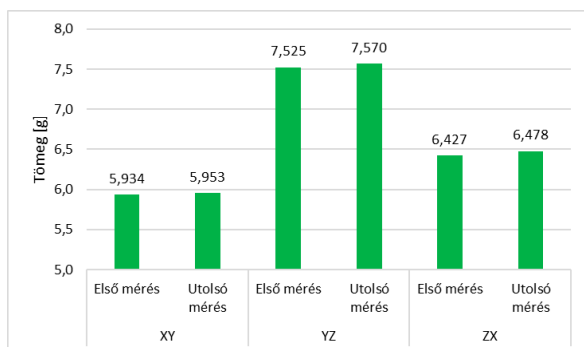
Vizsgáló gép	Instron 68TM-10
Vizsgálati mód	Húzó
Próbatest rögzítése	30 kN-os ékpályás szorítású befogó
Húzási sebesség	50 mm/perc
Adatrögzítési frekvencia	10 N és 0,01/mm
Nyúlásmérő	Ave 2
Kiértékelő szoftver	Bluehill Universal
Hőmérséklet	24±2 °C
Páratartalom	53 %

A kutatómunka témájának komplexitásából adódóan a mérések bizonyos korlátok között valósultak meg. Ugyanazon nyomtatási beállítások mellett történt a próbatetek nyomtatása, ugyanazon nyomtatóval, valamint csak szobahőmérsékleten történt a szakítóvizsgálat elvégzése. Ennek oka egyfelől, hogy a technológia jellemzően nagy szórásából adódóan a vizsgálat során a hangsúlyt inkább a mérések statisztikai kiértékelhetőségére lett helyezve, mintsem az átfogóbb, de szűrőpróbaszerű vizsgálatokra, másfelől cél volt, hogy első körben a fő jelenségeket azonosítsuk, ezzel még célzottabbá téve későbbi vizsgálatainkat. Továbbá, mivel a próbatetek gyártása jelentős időt vesz igénybe, így nem csak a nyomtatási paramétereket rögzítettük, hanem az elvégzett mechanikai vizsgálatokban is meg kellett hoznunk több kompromisszumot. Először is csak egytengelyű húzó vizsgálatokat végeztünk el, mely során csak a hosszirányú nyúlások voltak mérve. A keresztirányú nyúlásoknak a stabil mérését Aramis DIC (Digital Image Correlation) méréssel lehetett volna meghatározni. Ez hozzávetőlegesen tízszeresére növelte volna a méréselőkészítési, mérési és kiértékelési időt. A transzverzálisan izotróp modell teljes definiálásához 5 független paraméter szükséges (E_{xy} , E_z , ν_{xy} , ν_{xz} , G_z). Mivel a kutatás keretein belül a keresztirányú nyírási modulus (G_z) közvetlen mérésére (45°-os off-axis

húzóvizsgálat) nem volt lehetőség a korlátozott próbatests szám miatt, a nyírási paraméterek hiányában a felállított effektív modell tisztán tengelyirányú terhelési szimulációk esetén alkalmazható megbízhatóan. A teljeskörű térbeli feszültségállapotok (pl. csavarás, hajlítás) modellezéséhez elengedhetetlen a nyírási modulusok jövőbeli kísérleti meghatározása. Ahhoz, hogy egy végeselemes szoftverben ki lehessen alakítani egy olyan tesztszimulációt, mely egyfelől anyagmodell szinten transzverzálisan izotróp a hiányzó értékeket irodalmi adatokból próbáltuk közelíteni

2.3. Tömeg mérés eredményei

A kapott eredmények az 1. ábrán összességében azt mutatják, hogy a nyomtatást követően minimálisan nőtt a próbatestek tömege. Ezen értéknövekedések 0,01 és 0,04 gramm közötti növekedést jelentettek. Ezt a jelenséget az okozza, hogy a Nylon hajlamos nedvességet felvenni a levegőből, így a nyomtatási utáni vízfelvétel tömegnövekedést okozott. A próbatestek első és utolsó mérése között 185 és 290 óra közti idő telt el, ami egy és két hét közti időnek felel meg. Ez jól reprezentálja azt, hogy az alkatrész anyagparaméterei sokkal inkább relevánsak a nyomtatás után napokkal vagy hetekkel később, mint frissen nyomtatás után. Fontos megjegyezni, hogy a tömegnövekedés olyan csekély mértékű volt, hogy a szakirodalom alapján itt még nem jelentkezik érdemi szilárdságcsökkenés.

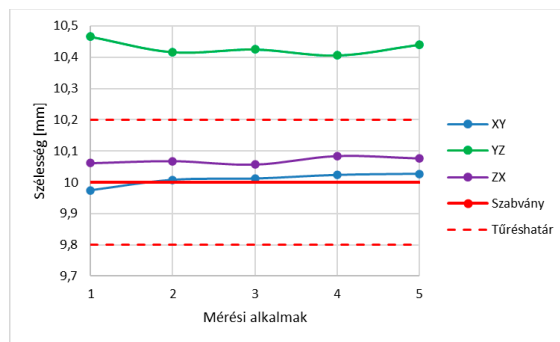


1. ábra: Próbatets tömegeinek átlaga

2.4. Geometriai pontosság mérés eredményei

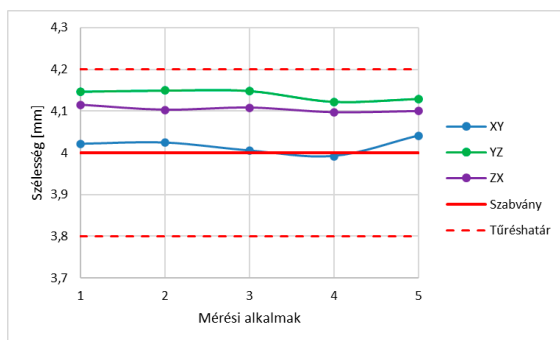
A 2. ábra a próbatestek szélesség, míg a 3. ábra a vastagság mérés eredményeit szemlélteti. A folytonos vonalak csak a tendencia szemléltetéséért szerepelnek a diagramokon. A diagramok nyomtatási irányként eltérő eredményeket mutatnak.

A 2. ábra alapján az YZ próbatestek rendelkeztek a legpontatlanabb nyomtatással. Ez a jelenség a támaszanyag maradványnak tudható be.



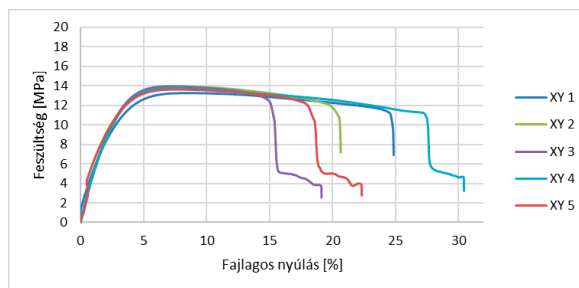
2. ábra: A próbatestek szélesség mérésének eredményei

A 3. ábrán látható vastagság mérés eredményeinek esetében is a legpontatlanabbnak az YZ próbatestek bizonyultak. Ennek oka, hogy a nyomtatófejnek nagy távokat kellett megtennie egyszerre, ami a rétegek minimális elmozdulását okozta, és ez rétegről-rétegre összeadódott.

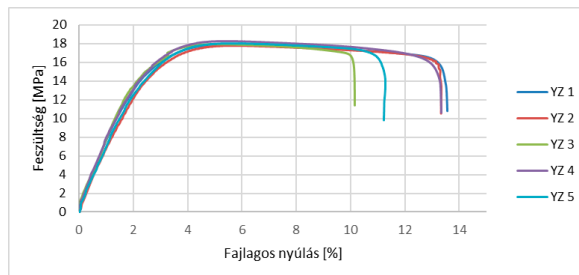


3. ábra: A próbatestek vastagság mérésének eredményei

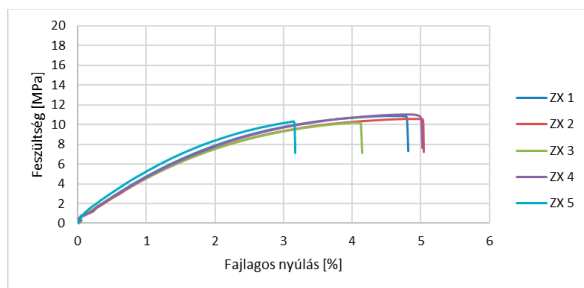
2.5. Szakítóvizsgálat eredményei



4. ábra: XY próbatestek feszültség-nyúlás diagramjai



5. ábra: YZ próbatestek feszültség-nyúlás diagramjai



6. ábra: ZX próbatestek feszültség-nyúlás diagramjai

A 4-6. ábrák alapján megállapítható, hogy a legnagyobb nyúlás értékeket a tönkremenetel előtt a XY irányú próbatestek érték el, a legkisebb nyúlási értékeket a ZX irányú próbatestek mutatták. A legnagyobb szakítószilárdság értékeket az YZ irányban nyomtatott próbatestek produkálták, míg a legkisebb értékeket ZX irányú próbatestek mutatták újfent.

2.6. Effektív anyagmodell definiálása

A lineárisan rugalmas anizotróp anyagmodellek definiálásához három különböző bemenő paraméterre van szükség. Ezek a Young-féle rugalmassági modulus, a Poisson-tényező, és a nyírási rugalmassági modulus.

Az FDM nyomtatási eljárás esetében a fűvóka a nyomtatás során az XY síkban mozog, így a rétegeken belül a szomszédos szálak között a kötés viszonylag egyenletesnek tekinthető. Ezzel a struktúra mechanikai válasza megegyezőnek feltételezhető az X és Y irányban. Ennek következtében meghatározható egy olyan transzverzálisan izotróp anyagmodell, ahol az X és Y irány izotróp anyagtulajdonságokat mutat, míg az Z irány pedig ezektől eltérő viselkedést.

A korábban elkészített feszültség-nyúlás diagramok alapján lehetett vonalillesztéssel meghatározni a Young-modulust. A diagramokon vizsgált, szabvány által előírt százalékos nyúlás tartományokra felvételre került egy lineáris trendvonal, amely egyenlet meredeksége adta meg a rugalmassági modulus. Itt fontos megjegyezni, hogy a szabvány által előírt nyúlási tartomány bizonyos esetekben zajjal terheltbbek, mint a későbbi szakaszok, így előállhat az, hogy a szabvány által definiált Young-modulus egyenese nagyobb nyúlási tartományokon, már jobban eltér a mért értékektől. Ezzel magyarázható, hogy az egymáshoz közel lévő diagramok miért produkálnak mégis nagy szórást a rugalmassági modulusok kiértékelésekor.

3. táblázat: A rugalmassági modulus kapott értékei

Próbatest száma	Young-modulus [MPa]		
	XY	YZ	ZX
1	442,8	813,24	436,39
2	525,8	775,15	331,1
3	572,3	724,98	397,75
4	556,7	716,61	350,68
5	149,8	752,72	592,54
Átlag	449,5	756,54	421,69
Szórás	174,8	39,26	103,96
Medián	525,8	752,72	397,75

A bemenő rugalmassági modulus értékek megadásakor az egyes irányok medián értékei lettek felhasználva, amelyekkel szimuláció a leghitelesebben adja vissza a mérési eredményeket.

A transzverzálisan izotróp effektív anyagmodellhez egy hosszirányú és egy keresztirányú rugalmassági modulus volt kimérve. A hosszirányú rugalmassági modulusként az YZ 5 próbatest, míg a keresztirányú rugalmassági modulusként az ZX 3 próbatest értékeit használtam fel. Azért a YZ irány rugalmassági modulus értékei lettek felhasználva, az XY irány rugalmassági modulus értéke helyett, mivel hogyha olyan alkatrészt akarunk nyomtatni, ahol az adott nyomtatási orientációban nagyobbak az oldalfal elemek felülete, mint a kezdő és záró rétegek felülete akkor ezt az YZ elrendezés jobban reprezentálja.

Általános esetben az XY irányú próbatestek rendelkeznek a legmagasabb rugalmassági modulus, azonban érdekes módon jelen esetben az YZ próbatestek magasabb értékekkel rendelkeznek. Ez az érdekes jelenség forrása a nyomtatási beállításokban rejlik. A falak számának kettő, és a vastagságuknak 0,8 mm lett beállítva. A felső és alsó rétegek számának négy, és ezek vastagságának 0,4 mm lett beállítva. Ezért az YZ próbatesteknél nagyobbak az oldalfal elemek felülete, mint az XY próbatesteknek. Mivel minkét esetben a húzási irányjal megegyező irányban futnak a szálak, valamint mivel a falak viselik a terhelést ezért ez megmagyarázza, hogy miért lettek magasabbak az YZ próbatest rugalmassági modulus értékei. Ez is jól szemlélteti, hogy az FDM eljárással nyomtatott szerkezetek szilárdsága mennyire érzékeny a gyártási paraméterekre. Ez tovább indokolja azon törekvésünket, hogy a megszokott gyakorlattal szemben – mely szerint minden, az anyagmodellt leíró paramétert mérjünk ki – célravezetőbb elsőként a fő jelenségeket azonosítani és adott esetben a hiányzó paramétereket szükségszerűen irodalmi adatokból pótolni.

A Poisson-tényező meghatározása esetében, mért értékek hiányában, egy olyan korábbi tanulmány értéke lett felhasználva [4] ahol szintén FDM eljárással nyomtatott, PA6 alapanyagú próbatesteket alkalmaztak.

A hosszirányú nyírási rugalmassági modulus az egyszerűsített Hooke-törvénnyel meghatározható, így az nem független változó:

$$G_{xy} = \frac{E_{xy}}{2(1 + \nu)} \quad (2)$$

Mivel az XZ és YZ síkokban az anyag anizotróp, a G_z keresztirányú nyírási modulus független paraméter, így nem számítható ki az izotróp összefüggésből. Ennek mérése (45°-os próbatestekkel) a jövőbeli kutatások tárgyát képezi. A jelenlegi paraméterek tisztán tengelyirányú sík feszültségállapotok becslésére alkalmasak.

4. táblázat: Az effektív anyagmodellhez szükséges értékek

Megnevezés	Jelölés	Érték	Forrás/ megjegyzés
Síkbeli (hosszirányú) rugalmassági modulus [MPa]	E_{xy}	753	Saját mérés
Keresztirányú rugalmassági modulus [MPa]	E_z	398	Saját mérés
Síkbeli Poisson-tényező [-]	ν_{xy}	0,42	Irodalmi becslés [4] alapján
Keresztirányú Poisson-tényező [-]	ν_{xz}	-	További mérést igényel
Síkbeli (hosszirányú) nyírási modulus [MPa]	G_{xy}	265	Számított
Keresztirányú nyírási modulus [MPa]	G_z	-	További mérést igényel

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A szakdolgozat alapvető célja egy transzverzálisan izotróp effektív anyagmodell létrehozása, valamint az egyes nyomtatási irányok vizsgálata volt azonos nyomtatási paraméterek biztosítása mellett FDM 3D nyomtatási eljárás esetében.

A három különböző irányban nyomtatott próbatestek felhasználásával tömeg és geometriai pontosság vizsgálatra került sor. A kapott eredmények azt mutatják, hogy a laposan nyomtatott próbatesteket lehet a legpontosabban reprodukálni, míg a legnehezebben a függőlegesen nyomtatott próbatesteket lehet.

A szakítóvizsgálati eredmények azt mutatták, hogy a legnagyobb nyúlás értékeket a tönkremenetel előtt a XY irányú próbatestek érték el. A legkisebb nyúlási értékeket

a ZX irányú próbatestek mutatták, tehát ezek voltak a legtürekenyebbek.

A kutatómunka számos limitációval rendelkezik, melyek kiküszöbölése még pontosabb eredményeket tenne lehetővé ezen felül a kutatási lehetőségeket is jelentősen kibővítené.

A 3D nyomtatás és az anyagmodellezési eljárások egy sokrétű, komplex témakör. Az elvégzett kutatómunka egy nagyszerű alapot ad arra, hogy a mért eredményekre alapozva további vizsgálatokat lehessen elvégezni.

További lehetőségek közé tartozik például, hogy más alapanyagból is kilehetne nyomtatni a próbatesteket, ezáltal a használt anyagok mechanikai tulajdonságokra való hatását lehetne vizsgálni. További érdekes vizsgálati témakör lenne, ezeket a próbatesteket más technológiával működő nyomtatókkal is kinyomtatni a nyomtatási technológiák összehasonlítása érdekében. További fontos irány lenne a próbatestek számát és a vizsgált paraméterek bővítése egy teljes mértékben határozott, és saját mért adatokra támaszkodó transzverzálisan izotróp effektív anyagmodell létrehozásához.

4. SUMMARY

The primary objective of this thesis was to making a transversely isotropic material model and to investigate the effects of different printing directions while maintaining consistent printing parameters in the FDM 3D printing process.

Mass and geometric accuracy were tested using test specimens printed in three different orientations. The results show that flat-printed test specimens can be reproduced most accurately, while vertically printed test specimens are the most difficult to reproduce.

The tensile test results showed that the specimens oriented in the XY direction exhibited the highest elongation values prior to failure. The specimens oriented in the ZX direction exhibited the lowest elongation values, meaning they were the most brittle.

This research has several limitations; overcoming them would not only yield more accurate results but also significantly expand the scope of future research.

3D printing and material modeling techniques constitute a multifaceted and complex field. The research conducted provides an excellent foundation for further studies based on the measured results.

Other possibilities include, for example, printing the test specimens from different materials, thereby allowing the effect of the materials used on the mechanical properties to be investigated. Another interesting area of research would be to print these test specimens using printers that employ different technologies, in order to compare the various printing technologies. Another important direction would be to expand the number of test specimens and the parameters examined to create a fully deterministic and transversally isotropic effective material model based on our own measured data.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Nemes Dánielnek a szakdolgozat téma biztosításáért, a szakmai iránymutatásért és támogatásért, a hasznos tanácsokért.

Debreceni Attilának a témavezetésért és a szakmai támogatásért.

File Máténak a konzulensi tevékenységért és a szakmai támogatásért.

A Debreceni Egyetem Gépészmérnöki Tanszékének az alapanyag és a laboratóriumi berendezések biztosítását.

6. IRODALOM

- [1] J.-W. Kim, H. Kim, és J. Ko, „Effect of changing printing parameters on mechanical properties of printed PLA and Nylon 645”, *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, kötet. 14, szám. 4, o. JAMDSM0056–JAMDSM0056, 2020, doi: 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0056.
- [2] S. Terekhina, I. Skorniyakov, T. Tarasova, és S. Egorov, „Effects of the Infill Density on the Mechanical Properties of Nylon Specimens Made by Filament Fused Fabrication”, *Technologies*, kötet. 7, szám. 3, o. 57, aug. 2019, doi: 10.3390/technologies7030057.
- [3] A. Yankin és mtsai., „Optimization of Printing Parameters to Enhance Tensile Properties of ABS and Nylon Produced by Fused Filament Fabrication”, *Polymers*, kötet. 15, szám. 14, o. 3043, júl. 2023, doi: 10.3390/polym15143043.
- [4] Z. Eren, C. A. Burnett, D. Wright, és Z. Kazancı, „Compressive characterisation of 3D printed composite materials using continuous fibre fabrication”, *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, kötet. 6, szám. 4, o. 494–507, dec. 2023, doi: 10.1016/j.ijlmm.2023.05.002.
- [5] Bergstrom, J. (2015) *Mechanics of solid polymers: Theory and computational modeling*. Amsterdam: William Andrew is an imprint of Elsevier.
- [6] Fish, J. (2014) *Practical multiscale*. Chichester, West Sussex, U.K: John Wiley & Sons Inc.
- [7] *Micromechanics of composite materials* (2012). Oxford: Elsevier Science & Technology.

CELLULÁRIS Ti6Al4V CSONTRÖGZÍTŐ LEMEZEK FÁRADÁSI ÉLETTARTAMÁNAK MEGHATÁROZÁSA KÍSÉRLETI ÉS NUMERIKUS MÓDSZEREKKEL

FATIGUE LIFE PREDICTION OF CELLULAR Ti6Al4V PLATE IMPLANTS USING EXPERIMENTAL AND NUMERICAL METHODS

Garay Richárd*, Dr. Manó Sándor**, Dr. Mankovits Tamás***

ABSTRACT

In traumatological cases requiring permanent implantation, the high stiffness of concise metal bone plates can lead to an undesirable stress shielding effect. This research presents an implant design approach that reduces plate stiffness through the application of porous structures, thereby promoting bone tissue ingrowth. In the first step, the parameters of the lattice structure were optimized using finite element bending simulations. The resulting specimens were manufactured from Ti-6Al-4V alloy using direct metal laser sintering (DMLS) technology on an EOS M290 metal 3D printer. Subsequently, the specimens were subjected to cyclic fatigue testing. The results are promising, although further optimization and research are required.

A permanens beültetést igénylő traumatológiai esetekben a tömör fém csontlemez nagy merevsége nemkívánatos feszültségárnyékolás (stress shielding) vezethet. Jelen kutatás egy olyan implantátumtervezési eljárást mutat be, amely porózus struktúrák alkalmazásával csökkenti a lemez merevségét, elősegítve a csontszövet benővekedését. Első lépésben végelemez hajlítási szimulációkkal optimalizáltuk a rácsszerkezet paramétereit. Az így kapott rácsszerkezetű mintákat közvetlen lézeres szinterelés (DMLS, direct metal laser sintering) technológiával, EOS M290-es fémnyomtatóval gyártottuk le Ti-6Al-4V ötvözetből. Ezután a mintákat ciklikus fáradástörzsvizsgálatnak vetettük alá. Az eredmények biztatóak, további optimalizálásra és kutatásra van szükség.

1. BEVEZETÉS

A humán csonttörések (különösen a hosszú csöves csontok, mint a sípcsont vagy a felkarcsont) klinikai kezelésének legelterjedtebb módja a csont külső felületére helyezett csontlemezekkel megvalósított ostosynthesis. A hagyományos orvosi implantátumok gyártásához leggyakrabban használt fémötvözet a Ti-6Al-4V titánötvözet, melynek használata az

orvostechnikai eszközök iparában már régóta bevett gyakorlat, mivel kiváló biokompatibilitással és mechanikai szilárdsággal rendelkezik. [1]

Ugyanakkor, a tiszta titán és a Ti-6Al-4V titánötvözet sem rendelkezik a csontéhoz hasonló anyagtulajdonságokkal. A Ti-6Al-4V nagyjából kétszer olyan merev, mint az emberi kortikális csont, és körülbelül hétszer akkora nyomószilárdsággal rendelkezik. [2]

Emiatt a merevségbeli különbség miatt jön létre az úgynevezett feszültségárnyékolás (továbbiakban stress shielding effect). A stress shielding effect hatására a merevebb implantátum átvállalja a mechanikai terhelés jelentős részét, így a rögzített csontszövetet nem éri elegendő fiziológiai stimulus, pedig a csontnak az új csontképződéshez rendszeres terhelésre van szüksége. Ez hosszú távon csontfelszívódáshoz, csonttrikuláshoz, az implantátum kilazulásához, sőt, másodlagos törésekhez vezethet. Elengedhetetlen tehát, hogy a titán- és titánötvözet-implantátumok tervezése úgy történjen, hogy azok minél jobban megfeleljenek a csontszövet természetes mechanikai reakciójának. [2, 3]

A csont-implantátum érintkezési felület közelében fellépő stress shielding effect csökkentésének egyik módja az implantátumok könnyítésére irányuló rácsos szerkezet kialakítása, amelynek célja az anyag térfogatmodulusa alapján meghatározott mechanikai tulajdonságok csökkentése. Az additív gyártástechnológiák, különösen a szelektív lézerolvasztás (DMLS) elterjedése lehetővé tette a komplex, mikroszkopikus rácsszerkezetek közvetlen integrálását az implantátumok testébe. [4]

A szakirodalomban vizsgált különböző rácsszerkezetek alkalmazása bizonyítottan csökkenti az implantátum ekvivalens merevségét. A porózus struktúra ráadásul csökkenti a csont és a lemez közötti közvetlen érintkezési felületet, az összekapcsolódó üregrendszer pedig biológiai csatornaként szolgál a tápanyagszállítás, a metabolizmus és a csontszövet benővése (osseointegration) számára, ami stabilabb rögzítést eredményez. [5, 6, 7]

* tanszéki mérnök, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék

** egyetemi docens, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék

*** tanszékvezető egyetemi docens, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék

Bár a nemzetközi szakirodalomban számos numerikus tanulmány foglalkozik porózus lemezek optimalizálásával, a gyártástechnológiai korlátok miatt a kísérleti és validációs adatok száma korlátozott. Jelen kutatás célja egy humán csontlemez rácsszerkezetű változatának tervezése, numerikus homogenizációja, valamint DMLS technológiával történő fizikai megvalósítása és kísérleti vizsgálata. [2, 5, 6, 7, 8, 9]

A munka során meghatároztuk a mintázat ekvivalens mechanikai tulajdonságait, majd a sikeres 3D nyomtatást követően laboratóriumi körülmények között vetettük alá a próbatesteket statikus és ciklikus mechanikai igénybevételeknek. A kapott kísérleti eredmények (fárasztási és statikus törési határadatok) közvetlen kiindulási pontként szolgálnak a testreszabott, csökkentett merevségű implantátumok hazai fejlesztéséhez.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

A kutatásban értékelt csonttrógerítő lemezeket EOS Titanium Ti64 Grade 23 por felhasználásával nyomtattuk. Ez az anyag egy biokompatibilis Ti-6Al-4V ötvözet, amelyet a szabványos Ti64-hez képest alacsonyabb oxigén- és vas-tartalom jellemez, így jobb nyúlást és szilárdságot biztosít. Az ötvözetpor megfelel a nemzetközi szabványoknak, többek között az ASTM B348, az ASTM F136 és az ASTM F3001 szabványoknak, részecskeméret-eloszlása 20-80 μm . Fő jellemzői közé tartozik a kis súly és a nagy szilárdság, a kiváló korrózióállóság, valamint a más könnyűfém-ötvözetekhez képest magas fáradási szilárdság. [10]

A tanulmányban optimalizált, rácsszerkezetű mintákat egy ipari minőségű EOS M290 fém 3D-nyomtatóval állítottuk elő. Ez a gyártórendszer a közvetlen fémlézeres szinterelés (DMLS) porágyas fúziós technológián alapul, amely az orvosi biológiai implantátumiparban irányadó szabványnak számít. A rendszer 250 mm x 250 mm x 325 mm-es precíz építési térfogattal rendelkezik, ami bőséges kapacitást biztosít több csonttrógerítő lemez egyidejű gyártásához. A titán-ötvözet-por szabályozott megolvastását egy nagy teljesítményű, 400 W-os Yb-szálás lézer végzi, amelynek fókuszátmérője rendkívül finom, körülbelül 100 μm . A titánhoz hasonló reaktív anyagok biztonságos feldolgozása érdekében a nyomtatási folyamatot egy a környezettől teljesen elzárt építőkamrában, védő argongáz-atmoszférában kell végrehajtani, hogy az oxigénnel való szennyeződést meg lehessen akadályozni. A rétegenkénti építési folyamatot 30 μm -es rétegvastagsággal hajtottuk végre, ami elengedhetetlen a nagy méretpontosság és felületi felbontás biztosításához. [11]



1. ábra EOS M290 DMLS fém 3D nyomtató [11]

A tanulmányhoz tervezett csontlemez teljes hossza 150 mm, szélessége 16 mm, teljes vastagsága pedig 5 mm. A test két csoportban 4-4 horonnyal rendelkezik, az egyes hornyok maximális hossza 10 mm, szélességük pedig 6 mm. Az egymást követő hornyok közötti távolság 16 mm, míg a két horony-csoport között 25 mm távolság van. Minden horony felső szélén egy 50°-os letörést alkalmaztunk, mely 1,3 mm mélységig nyúlik, hogy irányítsa a csavarfej csúszó mozgását a az eltört csontfelek közötti tengelyirányú összenyomás során. A csontlemez méretei a 3. ábrán láthatóak.

A porózus kialakítás szerkezeti összetételének jellemzésére geometriai térfogatelemzést végeztünk, hogy meghatározzuk a rácsszerkezet által elfoglalt terület pontos arányát. A lemez teljes térfogata 12000 mm³.

A horony egy lekerekített sarkú hosszúka alakzat, ahol a szélesség 6 mm, a maximális hosszúság pedig 10 mm. A felső horony esetében, viszont van egy 45 fokos letörés. A hornyok területe tehát:

$$\begin{aligned} A_{\text{horony}} &= (L_e \cdot 2R_l) + \pi R_l^2 = (4 \cdot 6) + (\pi \cdot 3^2) \\ &= 52,27 \text{ mm}^2 \\ A_{\text{felhorony}} &= (L_e \cdot 2(R_l + 1.3)) + \pi(R_l + 1.3)^2 = \\ &= (4 \cdot 8,6) + \pi \cdot 4,3^2 = 92,49 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Egy ilyen horony letöréssel ellátott üres térfogatát az egyenes henger és a csonka kúp alakú átmenet kombinálásával határozzuk meg:

$$\begin{aligned} V_{\text{horony}} &= (A_{\text{horony}} \cdot 3,7) \\ &+ \frac{1,3}{3} \left(A_{\text{horony}} + A_{\text{felhorony}} + \sqrt{A_{\text{horony}} \cdot A_{\text{felhorony}}} \right) \\ &= 286,26 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Ha a teljes térfogatból kivonjuk a 8 horony teljes térfogatát, megkapjuk a csontlemez vázának nettó hasznos anyagtérfogatát:

$$\begin{aligned} V_{\text{hasznos}} &= V_{\text{teljes}} - (8 \cdot V_{\text{horony}}) \\ &= 12000 - (8 \cdot 286,26) = 9709,92 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

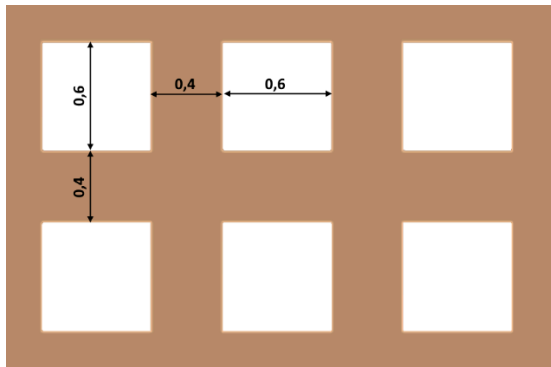
Ezután meghatározásra került a horonyok körüli védőperselyek térfogata is, ahol a $T = 5\text{ mm}$ (vastagság), az $R_{\text{külső}}$, pedig a védőpersely íves részének átmérője:

$$V_{\text{persely}} = 8 \cdot [(L_e \cdot 2R_{\text{külső}}) + \pi R_{\text{külső}}^2] \cdot T - V_{\text{horony}} \\ = 2451,44 \text{ mm}^3$$

Így tehát a lemez teljes rácsos területe, és annak százalékos megoszlása a teljes hasznos lemezhez viszonyítva:

$$V_{\text{rácsos}} = V_{\text{hasznos}} - V_{\text{persely}} = 5556,12 \text{ mm}^3$$

$$R = \frac{V_{\text{rácsos}}}{V_{\text{hasznos}}} \cdot 100 = \frac{5556,12}{9709,84} \cdot 100 = 57,22\%$$

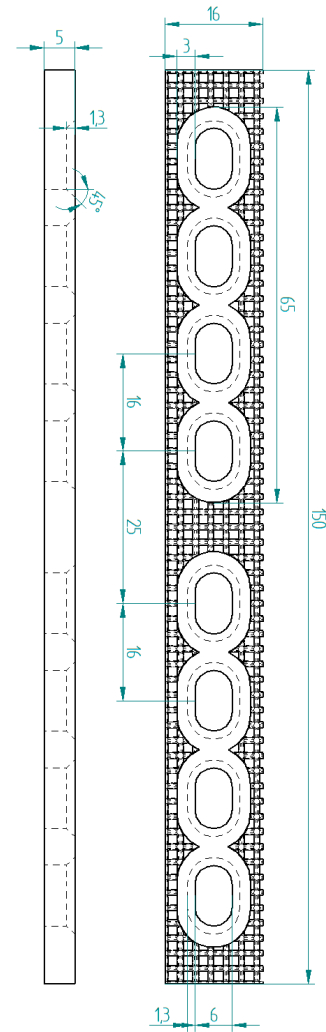


2. ábra A rácsos részek méretei

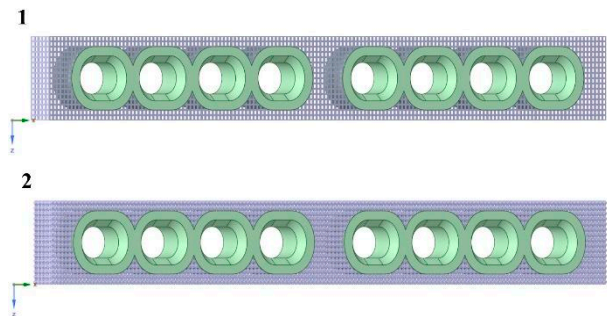
Az implantátum biomechanikai teljesítményére gyakorolt cellaszerkezeti felépítés hatásának értékelése érdekében két különböző szerkezeti konfigurációt vizsgáltunk. A két rácsos-topológiát, a kocka- és a kettős piramis-topológiát, integráltuk a lemez rácsnak meghagyott terébe. A tervezési környezetből kivont végleges geometriai konfigurációkat az 1. táblázat foglalja össze, a 2. ábra mutatja be a topológiák hosszát és vastagságát, a 4. ábra pedig a rácsszerkezetes csontlemezeket jeleníti meg 3D modellként. Az ok, amiért e kettő rácsos-topológia mellett döntöttünk, az egy korábbi kutatás eredménye alapján történt. Azt vizsgálták, hogy különböző rácsszerkezetes csavarokba mennyire tud belenőni a csontszövet, és a választott két rács-topológia hozta a legjobb eredményt az említett kutatás során. [12]

1. táblázat Rácsos csontlemezek tervezési paramétereit

N°	Topológia	Hossz (mm)	Vastagság (mm)	Kitöltési arány (%)
1	Cubic	1	0,4	28,65
2	Double Pyramid	1	0,4	57,17



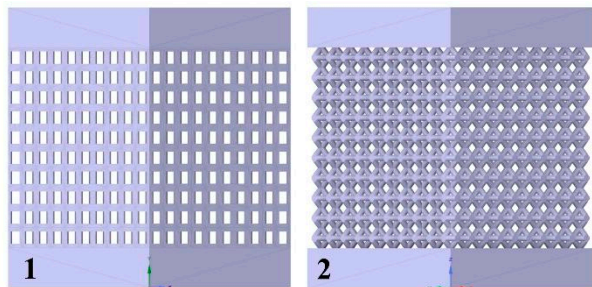
3. ábra A porózus csontlemez próbatest méretei



4. ábra A választott rácsszerkezetek

A csontlemezek mechanikai viselkedésének értékelése érdekében a fizikai additív gyártás megkezdése előtt numerikus végelem-elemzést (FEA) végeztünk az ANSYS Workbench szoftverben (verzió: 2026 R1). A teljes rácsos csontlemezek modellezésének nagy számítási igénye és geometriai bonyolultsága miatt szerkezeti homogenizációs megközelítést alkalmaztunk. Konkrétan a számításigényes rácsos területet egy ekvivalens tömör térfogattal helyettesítettük, amely homogenizált, izotróp, lineáris rugalmas

anyagjellemzőkkel rendelkezik. Ezt a helyettesítő modellezési technikát az Alkentar és Mankovits által validált módszertan szerint alkalmaztuk, akik bebizonyították, hogy a bonyolult rácsszerkezetek homogenizált helyettesítő modellel történő leváltása több mint százszorosára csökkenti a numerikus szimulációs időt, miközben a mérnöki tervezési alkalmazásokhoz kielégítő pontosságot biztosít. A helyettesítő modellek (továbbiakban nyomó próbatestek) az 5. ábrán láthatóak, az 1. táblázat alapján kell értelmezni a sorszámaikat. A rácsos rész egy 10x10x10 mm-es kocka, alul és felül ez a rácsos kocka csatlakozik 2db 2 mm vastag lemezhez. [13]



5. ábra Nyomó próbatestek

A csontlemezekkel végzett vizsgálatunkat megelőzően a kutatásba bevont nyomó próbatesteket vizsgáltuk meg, hogy validálni tudjuk a csontlemezekre kapott eredményeket. Minden esetben 4 próbatesten végeztünk nyomószilárdság mérést. Ezután meghatároztuk az effektív rugalmassági modulus (Young-modulus) a nyomó próbatesten végzett végeselemes szimuláció alapján. A következő részben szeretném bemutatni a számítás menetét. [13] Először a fajlagos alakváltozást határoztuk meg. A $L = 10$ mm élhosszúságú kockára $\Delta L = 0,1$ mm-es előírt elmozdulásos peremfeltételt alkalmaztam:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{0,1 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = 0,01 \quad (1\%)$$

Ezután meghatároztuk a névleges feszültséget. Ez az $A = 10 \cdot 10 \text{ mm} = 100 \text{ mm}^2$ keresztmetszetre ható, a végeselemes szimulációból származó F reakcióerőből adódó feszültség:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{100} \quad [\text{MPa}]$$

Ezután a Hooke-törvény alapján meghatároztuk a Young-modulust:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{100}}{0,01} = F \quad [\text{MPa}]$$

A választott geometriai méretek ($L = 10$ mm, $A = 100 \text{ mm}^2$) és a terhelési peremfeltétel ($\Delta L = 0,1$ mm)

következtében a szimulációban mért F reakcióerő (Newtonban) számértékileg közvetlenül megegyezik a homogenizált modell E Young-modulusával (MPa-ban).

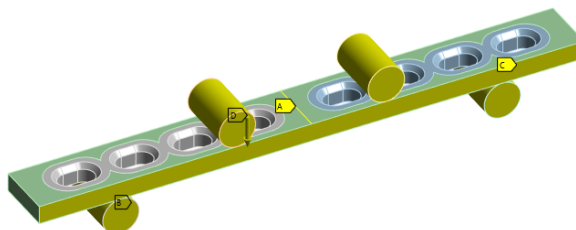
Példaként a „cubic 1-0,4” verzió esetén a szimulációból $F = 12\,813$ N reakcióerő adódott, amiből:

$$\sigma = \frac{12813 \text{ N}}{100 \text{ mm}^2} = 128,13 \text{ MPa}$$

$$E = \frac{128,13 \text{ MPa}}{0,01} = 12813 \text{ MPa}$$

A következő lépése a kutatásnak a csontlemezekre való végeselemes szimuláció elvégzése volt. A nyomó próbatestek kísérleti jellemzését követően a csontlemez végeselem-modelljét finomítottuk úgy, hogy a homogenizált rácsos tartomány anyagmodelljén belül az idealizált analitikus merevséget a tényleges, kísérletileg meghatározott rugalmassági modulusra cseréltük, miközben a Poisson-tényezőt a 0,3-as értéken tartottuk. [6, 7]. A rácsos rész anyagmodelljének beállítása után a szimuláció elrendezését az ASTM F382 szabványnak megfelelően állítottuk össze, mely szabványos keretet ad a csontlemezek négy pontos hajlítási vizsgálatának. A merev görgők geometriai elrendezését a szabvány szerint a következő konfigurációban határoztuk meg: A két felső terhelőgörgő közötti távolságot 41 mm-re állítottuk be, az alsó támasztóhengerek és a legközelebbi felső terhelőhenger közötti távolságot pedig 32 mm-re állítottuk be. A két alsó támasztóhenger közötti teljes távolságot 105 mm-re határoztuk meg. A 6. ábrán látható a görgők elrendezése a csontlemezen. [14]

A vizsgálat során elmozdulás-vezérelt terhelést alkalmaztunk. Azért nem erőt adtunk meg a felső görgőkön, hanem kényszerített elmozdulást, mert ebben az esetben a lemez elkezdene megfolyni (plasztikusan deformálódni), a szimuláció azonnal instabillá válna és leállna. [14, 15]



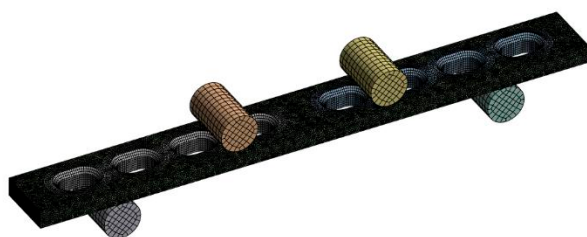
6. ábra A 4 pontos hajlítóvizsgálat elrendezése és az elmozdulásos kényszerek elhelyezkedése (Displacement)

A 6. ábrán látható test alsó és felső görgőinél rozsdamentes acél anyagmodellt használtunk ($E = 200$ GPa; $\nu = 0,3$). A hornyok és a körülöttük lévő tömör környezet esetében Ti-6Al-4V anyagmodellt használtunk ($E = 107$ GPa; $\nu = 0,323$), a rácsos szerkezetnél pedig a nyomó próbatest adatai alapján készítettünk egy saját anyagmodellt, ahol az E értéket végül a valós, kinyomtatott nyomó próbatesteken mért eredmények alapján választottuk meg, ezeket a 2. táblázatban lehet

olvasni (cubic 1-0,4 esetében: $E = 2862 \text{ MPa}$; $\nu = 0,3$; double pyramid 1-0,4 esetében: $E = 5318 \text{ MPa}$; $\nu = 0,3$).

A 4 pontos hajlítóvizsgálat végelelemes modelljében a peremfeltételeket előírt elmozdulásos kényszerekkel (Displacement) állítottuk be (7. ábra). A két alsó támasztó görgőt minden szabadságfokban rögzített támaszként határoztuk meg ($U_x = U_y = U_z = 0$). A felső terhelő görgőkre egyenletes lefelé irányuló függőleges elmozdulást írtunk elő a „Remote Displacement” kritériumok alkalmazásával, miközben oldalirányú és tengelyirányú mozgásukat korlátoztuk a test elmozdulásának megakadályozása érdekében. A görgők és a titán csontlemez közötti érintkezési felületekre nemlineáris, súrlódásmentes („Frictionless”) érintkezési modelleket rendeltünk hozzá, hogy a hajlítási alakváltozás során szabad csúszás legyen lehetséges. A valóságban az anyagvizsgáló berendezés edzett acélhengerei és a nyomtatott titánlemez felülete a mérés alatt minimálisan elcsúsznak egymáson, ahogy a lemez behajlik. Ha itt fix („Bonded”) kontaktot adnánk meg, a végelelemes vizsgálatot végző program mesterségesen megnövelné a lemez merevségét (shear lock), ami hibás eredményt adna. [16]

A 7. ábrán látható a végelelemes modell hálózás után. A hálózást globálisan 1,5 mm-es elemekkel végeztük el, másodrendű elemekkel. A rácsos részt finomítottuk, ott 0,5 mm-es elemméretet használtunk.



7. ábra A 4 pontos hajlítóvizsgálat elrendezése és a hálózás utáni állapota

A végelelemes szimulációkat követően, azonos perem- és terhelési feltételek mellett, kísérleti statikus vizsgálatokat is végeztünk az Instron 8874 típusú anyagvizsgáló berendezésen. A görgők távolságát a valóságban is pontosan ugyanúgy állítottuk be, mint a végelelemes szimulációk esetében. A statikus vizsgálatok eredményeit felhasználva állítottuk be a fárasztóvizsgálatot. A ciklikus fárasztóvizsgálatokat állandó 5 Hz-es terhelési frekvencia alkalmazásával végeztük, a kísérletek maximális futásszámát (fárasztási élettartam-bázisát) pedig egységesen 100 000 ciklusban határoztuk meg. [17]

Az elmozdulás-vezérelt ciklikus fárasztóvizsgálatok során a csontlemezek szerkezeti degradációjának nyomon követésére a nyers minimum és maximum terhelés értékek helyett a dinamikus merevséget alkalmaztuk. Ennek módszertani oka, hogy elmozdulás-vezérlés mellett a mért erő nem független változó, hanem a próbatest pillanatnyi válaszképzése, ezen értékek önmagukban nem képesek elkülöníteni a

vizsgálóberendezés löket-ingadozásait az anyag valós fáradásos lágyulásától. Tehát nem a gép által kijelzett nyers erőértékeket figyeltük, hanem a lemez valós ellenállását, vagyis, ha a fix mértékű hajlításhoz a ciklusok során egyre kisebb erő szükséges, az a lemez belső gyengülését (fáradását) jelzi, függetlenül a gép apróbb mozgási ingadozásaitól. Ezen felül a szerkezet belső sérülése és a repedések terjedése során fellépő kontaktvesztések és felütközések olyan dinamikus erőtüskéket produkálnak, amelyek a nyers adatokat eltorzítanak. A merevség számítása ezeket a zajokat hatékonyan kiszűri, és közvetlenül a teherviselő keresztmetszet tényleges csökkenését számszerűsíti. A dinamikus merevséget minden ciklusra az erőtartomány és a hozzátartozó elmozdulás-tartomány hányadosaként határoztuk meg az alábbi összefüggés szerint: [18]

$$K_{\text{dyn}} = \frac{|F_{\text{max}} - F_{\text{min}}|}{|S_{\text{max}} - S_{\text{min}}|}$$

A próbatestek összehasonlíthatósága érdekében az adatokat relatív merevséggé (%) konvertáltuk. A mérések legelső ciklusaiban tapasztalható kezdeti beágyazódási, felületi igazodási (úgynevezett toe-in) hatások kiküszöbölése céljából a bázisértéket (100%) egységesen a szerkezetileg már stabilizálódott 100. ciklus egyedi merevsége jelentette. [18, 19]

3. MÉRÉSI EREDMÉNYEK ÉS SZIMULÁCIÓ

Először a nyomó próbatestek eredményeit szeretném bemutatni. A 2. táblázatban látható adatok a rács topológiánként elvégzett 4-4 mérés átlagai, így megadtam a valós mérések relatív szórását is. Az eltérési arány szemlélteti, hogy a FEA mérés hányszorosa a valós méréseknek. A nyomó próbatestek szimulációs és fizikai valóságban mért eredményei a második táblázatban láthatóak, a kinyomtatott próbatestek pedig a 8. ábrán szerepelnek.

2. táblázat A nyomó próbatestek mérési eredményei

N°	Young Modulus (MPa)	Valós (MPa)	Relatív Szórás (%)	Eltérési arány
1	10254	2862	6,31	3,6
2	14881	5318	6,13	2,8

Az nyomó próbatestek által a szerkezeti merevségre vonatkozó jelentős és szisztematikus túlbecslés minden vizsgált topológiánál nyilvánvaló. Az 1. próbatest (Cubic 1-0,4) esetében az FEA-modell 10 254 MPa rugalmassági moduluszt jósolt, míg a kísérleti nyomóvizsgálat 2 862 MPa tényleges értéket eredményezett, ami 3,6-szoros eltérést jelent. Hasonló tendencia figyelhető meg a 2. mintánál (Double Pyramid 1-0,4) is, ahol a merevség a 14 881 MPa-os numerikus értékről 5318 MPa-os kísérleti értékre csökkent (2,8-szoros csökkenés).

Ezeket a nagy különbségeket sok tényező okozhatja. A FEA elemzések feltételezik a teljesen tökéletes próbatestet, de sajnos a valóságban ilyen nem létezik. A nagy különbséget az eredményekben okozhatja például a próbatestek tárgyasztalról való eltávolítása, a nyomtatás közben beszorult por, a támasztékok határain tapadó, meg nem olvasztott vagy részlegesen zsugorított porrészcscék és a helyi hőtorzulás. Ahogyan azt Çalışkan és munkatársai, illetve Kaymaz és munkatársai is hangsúlyozták, a gyártási folyamatból adódó eltérések és a mikroszerkezeti heterogenitás miatt a rácsos alkatrészek névleges tervezése és a tényleges teljesítménye között mindig szisztematikus eltérés áll fenn. [7, 16] Tehát a többszintű validáció elengedhetetlen a kutatás sikerességéhez. [20] Tovább vizsgálva a mért eltérések okát, olvashatjuk, hogy Van Bael és munkatársai alapvető mikro-CT vizsgálatai szerint az additív gyártással előállított támasztékok keresztmetszeti vastagsága következetesen nagyobb a tervezettnél (gyakran meghaladja a $+112\mu\text{m}$ -es eltérést). Ennek három oka van: a lézersugár fókuszánál kialakuló kiterjedt olvadámedence (melt pool), a ferde rudak lépcsőzési effektusa (staircase effect) és a környező laza por ráragadása miatt. [21]

Ezen felül a fizikai nyomószilárdsági vizsgálat során a próbatest és a nyomólemez közötti érintkezési felületen bekövetkező kezdeti nemlineáris beállási fázis („toe-in” viselkedés) mesterségesen felfelé torzíja a rögzített elmozdulási adatokat, ami a számítógépes modellekben alkalmazott merev, matematikailag tökéletes határfeltételekhez képest jelentősen lefelé tolja a számított kísérleti Young-modulust. [22, 23]



8. ábra Nyomtatott nyomó próbatestek

Végül 6db csontlemezt sikerült kinyomtatnunk, ezek a 8-as ábrán láthatóak. A kutatás egyik fő technológia célja egy nem hagyományos, nyitott határokkal (kifutó rácsokkal) rendelkező csontlemez nyomtathatósági tartományának vizsgálata volt. Ez azt jelenti, hogy a rácsos szerkezet közvetlenül a külső hosszanti éleken végződik, anélkül, hogy szilárd külső burkolófal határolná. A gyártás során kiderült, hogy ez a burkolat nélküli elrendezés súlyos gyártási korlátokkal jár. A szilárd külső perem hiánya miatt rendkívül nehéz volt megfelelő mechanikai rögzítést és stabil érintkezési felületeket biztosítani az ideiglenes támasztószerkezetek

számára. Ennek eredményeként csak az első számú próbatestet, a Cubic 1-0,4 konfigurációt sikerült elfogadható szerkezeti integritással legyártani. Az alternatív rácsváltozatoknál vagy helyi szerkezeti összeomlás következett be a rétegenkénti lézeres olvasztási folyamat során, vagy végzetes törés történt a maradékfeszültség-koncentrációk hatására a gyártóplatformról történő leválasztási művelet során. Mindazonáltal a Cubic 1-0,4 lemez sikeres legyártása bebizonyította, hogy a támasztóelemek vastagságának egy meghatározott küszöbértéke elegendő szerkezeti stabilitást biztosít ahhoz, hogy ellenálljon ezeknek a gyártási feszültségeknek. Következésképpen ezt az egyetlen, robusztus változatot használtuk fel az összes későbbi kísérleti validáláshoz, ami rendkívül megbízható és reprezentatív adatokat szolgáltatott a nyitott határokkal rendelkező tervezési koncepcióhoz.

Az első két lemezen, a C1-04-01B-n és a C1-04-02B-n az optimális fásasztási terhelési tartomány meghatározása érdekében, előzetes, statikus vizsgálatok végeztünk. A szabvány alapján megmértük 2 mm/min sebességgel, hogy mekkora a hajlítószilárdság, illetve mekkora erő szükséges a tönkremenetelhez. Ezen előteszt célja tehát a rácsszerkezet fáradási karakterisztikájának kísérleti feltérképezése és a későbbi, nagy ciklusszámú vizsgálatok peremfeltételeinek pontosabb kalibrálása volt. Ezek alapján a csontlemezek átlagosan 231 N terhelés alatt törtek el, ami 1,41 mm-es aktuátor-elmozdulásnak felelt meg, miközben a nominális, alakhibáktól mentes vége-selemes analízis (FEA) csak 463 N-nál jelzett strukturális tönkremenetelt. A vége-selemes vizsgálatnál a második fejezetben említett módszert használva, a rácsos rész Young-modulusának a valóságban mért értéket adtuk meg ($E_{\text{real}} = 2862 \text{ MPa}$).

Ez a viselkedés a gyártás során keletkező geometriai tökéletlenségekre vezethető vissza. A csontlemezekben a nyomtatás után U-alakú vetemedést lehetett észlelni. Ez az alakhiba szoros összefüggésben áll a DMLS (Direct Metal Laser Sintering) technológiára jellemző hőmérséklet-gradiens mechanizmussal (TGM). A Ti-6Al-4V por lokális lézeres olvasztása és az azt követő gyors lehűlés jelentős hosszirányú maradó húzófeszültségeket generált a munkadarab felső rétegeiben. Amennyiben a gyártást követően, a tárgyasztalról való eltávolítás előtt, nem történik meg a belső feszültségek teljes körű termikus relaxációja (feszültségmentesítő hőkezelése), a mechanikai leválasztás pillanatában a felhalmozódott feszültségek felszabadulnak. Ez a rugalmas relaxáció okozza a lemez széleinek felhajlását, azaz a dokumentált 0,6 mm-es U-alakú hosszirányú vetemedést.

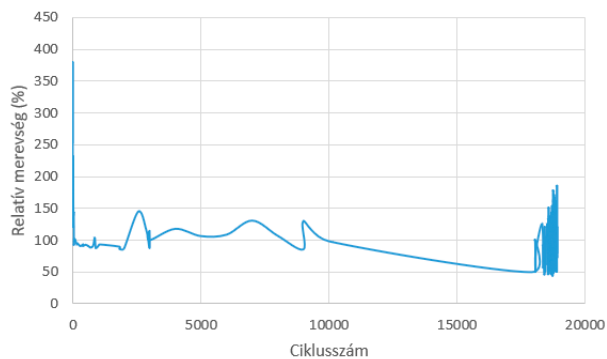
Amint a vége-selemes modellt pontosítottuk és a 0,6 mm-es vetemedést is hozzáadtuk a szimulációhoz, a valós eredményhez nagyon közeli 238 N terhelés alatti törést kaptunk (3,4%-os eltérés). A 9-es ábrán a csontlemezek által a lapra vetett árnyékból is látható a hosszirányú vetemedés. [24, 25]



9. ábra A kinyomtatott Cubic1-0,4 típusú csontlemezek

Ezután fárasztóvizsgálatnak vetettük alá a maradék 4 próbatestet. Az előtesztelt tapasztalatait felhasználva a maximum terhelést -208 N-ban határoztuk meg (miután lefelé terheljük a lemezeket), a minimumot pedig -50 N-ban határoztuk meg, a szabványnak megfelelően.

A korábban említett -208 N-os terhelést az első fárasztóvizsgálatra szánt próbatesten próbáltuk ki (C1-04-03BF). A próbatest 18 898 ciklus után tört el.

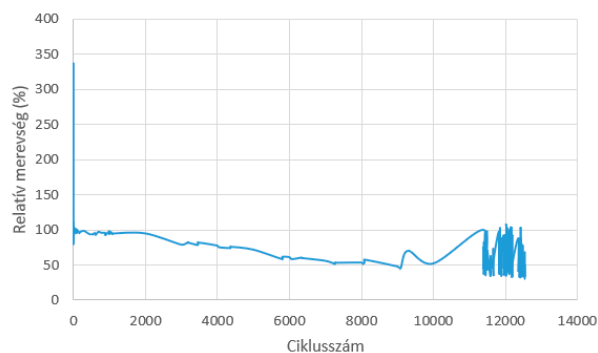


10. ábra C1-04-03BF próbatest relatív merevsége

A 10. ábrán látható az 03BF próbatest relatív merevsége, itt láthatjuk, hogy nagyjából 10 000 ciklusig aránylag állandó a merevség, majd utána szép lassan veszít a merevségéből a lemez. A 18 000 ciklushoz közelítve viszont a csontlemez makroszkopikus törést szenvedett, és elcsúszott a görgők alatt. A felemelkedő görgők teljesen elhagyták a próbatestet, majd a visszaút során erejű ütések mértek a lemezre (a legnagyobb az 18889. ciklusban történt, egy +185 N-os ütés). Tehát a

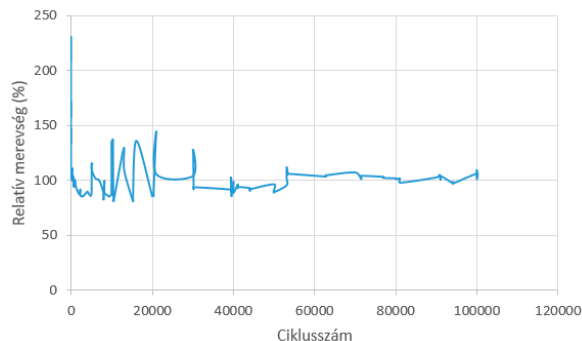
diagramm végén látható kaotikus zóna már nem a lemez valós merevségét mutatja. A lemezek fárasztás utáni statikus teherbírását is elemeztem, az első próbatest 108 N-t bírt még el.

A következő próbatest a C1-04-04BF csontlemez, melynek relatív merevsége a 11. ábrán látható. A fárasztóvizsgálat lefolyása hasonló az előző próbatestnél tapasztaltakhoz, a kaotikus zóna körülbelül 11 400 ciklus után következik be. annyi különbséggel, hogy a -208 N terhelés helyett, itt csak -184 N-t adtunk meg, remélve, hogy a próbatest jobban fogja bírni a vizsgálatot. Az előző próbatesthez képest, kisebb terhelésen 12 540 ciklust bírt csak a 04BF próbatest. A 04BF próbatest maradó statikus teherbírása 86,6 N volt.



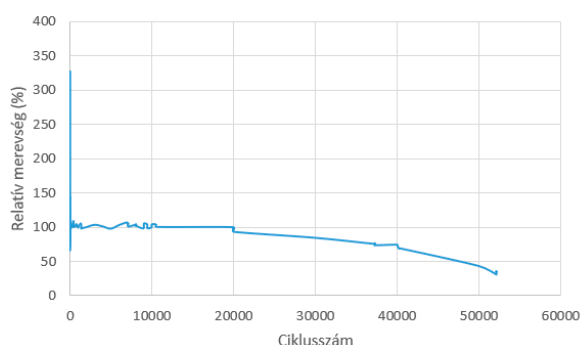
11. ábra C1-04-04BF próbatest relatív merevsége

A következő C1-04-05BF próbatest esetén drasztikusan lecsökkentettük a terhelést, mindössze -130 N-nal terheljük meg a testet. A 12. ábrán jól látható, hogy a fárasztóvizsgálat szépen végigfutott és a próbatest teljesítette a 100 000 ciklust. Ami viszont még érdekesebb, hogy a fárasztás közben a csontlemez merevsége javult, sőt a maradó statikus teherbírása 326,4 N volt. Ez az eredmény a geometriai beágyazódásnak köszönhető, melynek során a görgők alatti mikroszkopikus felületi érdességek plasztikusan elsimultak. Mivel a lemez enyhén beágyazódott a szerszám alá, a terhelés eloszlása sokkal homogénebbé vált. A ciklikus mozgások ráadásul segítettek feloldani a gyártásból visszamaradt lokális feszültségcsúcsokat anélkül, hogy repedést indítottak volna el. [24, 25]



12. ábra C1-04-05BF próbatest relatív merevsége

Az utolsó fárasztóvizsgálatnak kitett C1-04-06BF próbatest merevségi adatai a 13. ábrán láthatóak. Ez a próbatest 52 152 ciklust bírt, itt 162 N-os terhelést helyeztünk a lemezre. Nagyon hosszú, stabil merevséget kapunk ebben az esetben, 20 000 ciklus után kezd el lassan csökkenni a merevség. A lemezben nem egy-két kritikus pont hibásodott meg hirtelen, hanem a fáradás által okozott repedések homogén módon oszlottak el a teljes térfogatban. Végül a maradó statikus teherbírása csak 70 N volt, tehát a próbatest sokáig bírta a ciklusokat, de a teszt végére a belső anyagszerkezet szinte teljesen elroncsolódott, nem hagyva statikus tartalékot. A 14. ábrán a próbatestek törési pontjai láthatóak a statikus törésvizsgálat után.



13. ábra C1-04-06BF próbatest relatív merevsége



14. ábra A Cubic1-0,4 típusú csontlemezek a statikus törésvizsgálatok után

4. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

Ez a tanulmány végérvényben egy integrált kísérleti és numerikus keretrendszert hozott létre a 3D-nyomatott DMLS Ti-6Al-4V csontlemezek fáradási viselkedésének és szerkezeti integritásának értékelésére. A főbb következtetések közül az egyik, hogy a csontlemez tárgyasztalról való eltávolításával okozott, 0,6 mm-es U-alakú deformáció figyelembevétele a helyettesítő modell hibáját ~50%-ról 3,4%-ra csökkentette, megerősítve, hogy a nyomtatás/gyártás torzulásait be kell építeni az FEA modellbe a prediktív megbízhatóság biztosítása érdekében. A kutatás során mi is bizonyítottuk, hogy sokszorosával rövidíthető a szimulációs idő, ha helyettesítő modellt használunk. [13, 26]

A különböző meghibásodási módok ellenére (amelyek a teljes töréstől a merevség javulásáig terjednek) minden lemez esetében megfigyelhető volt egy közös kezdeti beállási fázis, amelyet egy stabil, állandósult merevségi szint követett, ami alátámasztja, hogy a dinamikus merevség megbízható károsodási mutatóként szolgál. [27]

A fáradás utáni statikus vizsgálat feltűnő kettős viselkedést tárt fel. A sérült lemezek szilárdsága a kiindulási érték 30-47%-ára csökkent, míg a C1-04-05BF próbatest 326,4 N maradó szilárdságot mutatott (a kiindulási érték 141,3%-a), ami ciklikus alakváltozásos keményedést és a geometriai beágyazódás pozitív hatásait mutatja be. A 3. táblázat a próbatestek összefoglaló adatait hivatott bemutatni.

3. táblázat Összefoglaló táblázat a csontlemezekről

Próbatest	C1-04-03BF	C1-04-04BF	C1-04-05BF	C1-04-06BF
Elért Ciklusszám	18 898	12 540	100 001	52 152
Végső Relatív Merevség	79,80%	30,60%	101,40%	36,10%
Maradó Statikus Teherbírás	108,7 N (47,1%)	86,6 N (37,5%)	326,4 N (141,3%)	70,2 N (30,4%)
Maximum Terhelés	208 N	184 N	130 N	162 N

Míg a kutatás során feldolgozott más kutatások nagyrészt vagy a kezdeti feszültségi állapotokból levezetett, tisztán elméleti fáradási élettartam-előrejelzésekre támaszkodnak [9], vagy a geometriai bizonytalanságok kiküszöbölésére szolgáló komplex valószínűségi ciklusokra [7], ez a munka egy közvetlen, kalibrált, helyettesítő FEA-munkafolyamatot mutat be, amelyet fizikai vizsgálatokkal validáltunk. A nyomtatás utáni integritást kizárólag statikus törésvizsgálatokkal értékelő szabványos szerkezeti optimalizálási módszerekkel ellentétben [5, 6], mi fárasztóvizsgálatot is végeztünk, ami egy egyedi jelenséget is feltárt. A 100 000 ciklusig tartó ciklikus terhelés nem rontja egyenletesen a DMLS Ti-6Al-4V rácsszerkezeteket,

inkább a ciklikus alakváltozásos keményedés és a geometriai beágyazódás révén 141,3%-os ugrást eredményezhet a statikus maradó teherbírásban, egy olyan teljesítményugrást, amelyet a standard numerikus modellek természetüknél fogva figyelmen kívül hagynak.

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

This study established an integrated experimental and numerical framework for evaluating the fatigue behavior and structural integrity of 3D-printed DMLS Ti-6Al-4V bone plates. One of the main conclusions is that accounting for the 0.6 mm U-shaped deformation caused by removing the bone plate from the build plate reduced the surrogate model's error from ~50% to 3.4%, confirming that manufacturing/printing distortions must be incorporated into the FEA model to ensure predictive reliability. In our research, we also demonstrated that simulation time can be reduced by a factor of several times when using a surrogate model. [13, 26]

Despite the various failure modes (ranging from complete fracture to an increase in stiffness), a common initial settling-in phase was observed for all plates, followed by a stable, steady-state stiffness level, which supports the notion that dynamic stiffness serves as a reliable indicator of damage. [27]

The static test conducted after fatigue revealed a striking dual behavior. The strength of the damaged plates decreased to 30-47% of the initial value, while the C1-04-05BF test specimen exhibited a residual strength of 326.4 N (141.3% of the initial value), demonstrating cyclic strain hardening and the positive effects of geometric embedding. Table 3 presents a summary of the test specimens' data.

Table 3. Summary table of bone plates

Specimen	C1-04-03BF	C1-04-04BF	C1-04-05BF	C1-04-06BF
Cycles to Failure	18 898	12 540	100 001	52 152
Final Relative Stiffness	79.80%	30.60%	101.40%	36.10%
Residual Static Strength	108.7 N (47.1%)	86.6 N (37.5%)	326.4 N (141.3%)	70.2 N (30.4%)
Maximum Load	208 N	184 N	130 N	162 N

While the studies reviewed in this research largely rely either on purely theoretical fatigue life predictions derived from initial stress states [9] or on complex probabilistic cycles designed to eliminate geometric uncertainties [7], this work presents a direct, calibrated, surrogate FEA workflow that has been validated through physical testing. In contrast to standard structural optimization methods that evaluate post-print integrity

exclusively through static fracture tests [5, 6], we also conducted fatigue testing, which revealed a unique phenomenon. Cyclic loading up to 100,000 cycles does not degrade DMLS Ti-6Al-4V lattice structures uniformly. But rather, through cyclic strain hardening and geometric embedding, can result in a 141.3% increase in static residual load-bearing capacity, a performance leap that standard numerical models, by their very nature, fail to account for.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNTÁS

Ezúton szeretnénk megköszönni Csámér Lórándnak a fém 3D nyomtatásban nyújtott segítségét, Nemes Dánielnek és Huri Dávidnak a hasznos szakmai konzultációkat, valamint File Máténak a végeselemes modell beállításához nyújtott támogatását.

7. IRODALOM

- [1] OSHIDA Y.: *Bioscience and Bioengineering of Titanium Materials*, Elsevier, 2010
- [2] MCGREGOR M., PATEL S., MCLACHLIN S., VLASEA M.: *Architectural bone parameters and the relationship to titanium lattice design for powder bed fusion additive manufacturing*, Additive Manufacturing, Vol. 46, 2021, 102273, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102273>
- [3] TONINO A. J., DAVIDSON C. L., KLOPPER P. J., LINCLAU L. A.: *Protection from stress in bone and its effects. Experiments with stainless steel and plastic plates in dogs*, The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume, Vol. 58-B, No. 1, 1976, pp. 107–113, <https://doi.org/10.1302/0301-620X.58B1.1270486>
- [4] ARABNEJAD S., JOHNSTON B., TANZER M., PASINI D.: *Fully porous 3D printed titanium femoral stem to reduce stress-shielding following total hip arthroplasty*, Journal of Orthopaedic Research, Vol. 35, No. 8, 2017, pp. 1774–1783, <https://doi.org/10.1002/jor.23445>
- [5] JIA D., LI F., ZHANG C., LIU Y.: *Design and simulation analysis of Lattice bone plate based on finite element method*, Mechanics of Advanced Materials and Structures, Vol. 28, No. 13, 2021, pp. 1311–1321, <https://doi.org/10.1080/15376494.2019.1665759>
- [6] XU S., DING X., XIONG M., DUAN P., ZHANG H., LI Z.: *The optimal design of 3D-printed lattice bone plate by considering fracture healing mechanism*, International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, Vol. 39, No. 3, 2023, e3682, <https://doi.org/10.1002/cnm.3682>
- [7] KAYMAZ I., YAVUZ O., MURAT F., KORKMAZ I. H.: *Designing a Novel Porous Fixation Plate with a Gyroid Lattice Structure for Humerus Fractures Using a Probabilistic Approach*, Advanced Engineering Materials, Vol. 26, No. 2, 2024, 2300911, <https://doi.org/10.1002/adem.202300911>

- [8] SUBASI O., KARAISSMAILIOGLU B., ASHKANI-ESFAHANI S., LAZOGLU I.: *Investigation of lattice infill parameters for additively manufactured bone fracture plates to reduce stress shielding*, Computers in Biology and Medicine, Vol. 161, 2023, 107062, <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2023.107062>
- [9] MEHBOOB A., MEHBOOB H., OULDYEROU A., BARSOUM I.: *Computational biomechanical analysis of Ti-6Al-4V porous bone plates for lower limb fractures*, Materials & Design, Vol. 240, 2024, 112842, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112842>
- [10] EOS GMBH: *EOS Titanium Ti64 Grade 23 Material Data Sheet*, EOS GmbH Electro Optical Systems, Krailling/Munich, 2026, <https://www.eos.info> (elérve: 2026.07.14)
- [11] EOS GMBH: *EOS M 290 - Mid-size Metal 3D Printer for Industrial Production*, EOS GmbH Electro Optical Systems, Krailling/Munich, <https://www.eos.info/metal-solutions/metal-printers/eos-m-290> (elérve: 2026.07.14)
- [12] KOVÁCS Á. É., CSERNÁTONY Z., CSÁMER L., MÉHES G., SZABÓ D., VERES M., BRAUN M., HARANGI B., SERBÁN N., ZHANG L., et al.: *Comparative Analysis of Bone Ingrowth in 3D-Printed Titanium Lattice Structures with Different Patterns*, Materials, Vol. 16, No. 10, 2023, 3861, <https://doi.org/10.3390/ma16103861>
- [13] ALKENTAR R., MANKOVITS T.: *Development of Surrogate Model for Patient-Specific Lattice-Structured Hip Implant Design via Finite Element Analysis*, Applied Sciences, Vol. 15, No. 7, 2025, 3522, <https://doi.org/10.3390/app15073522>
- [14] ASTM F382-99: *Standard Specification and Test Method for Metallic Bone Plates*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, <https://doi.org/10.1520/F0382-99R03E01>
- [15] ZHANG C., ZHANG L., LIU L., LV L., GAO L., LIU N., WANG X., YE J.: *Mechanical behavior of a titanium alloy scaffold mimicking trabecular structure*, Journal of Orthopaedic Surgery and Research, Vol. 15, 2020, 40, <https://doi.org/10.1186/s13018-019-1489-y>
- [16] CHANDRA G., PANDEY A.: *Biomechanical evaluation on a novel design of biodegradable embossed locking compression plate for orthopaedic applications using finite element analysis*, Biomechanics and Modeling in Mechanobiology, Vol. 21, No. 5, 2022, 1371–1392, <https://doi.org/10.1007/s10237-022-01596-z>
- [17] ASTM F382-99: *Standard Specification and Test Method for Metallic Bone Plates*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, <https://doi.org/10.1520/F0382-99R03E01>
- [18] RIVAS I., SAINZ-AJA J. A., FERREÑO D., CARRASCAL I., CASADO J., DIEGO S.: *Influence of Aging Conditions on the Dynamic Stiffness of EPDM and EVA Rail Pads*, Applied Sciences, Vol. 15, No. 8, 2025, 4394, <https://doi.org/10.3390/app15084394>
- [19] MAGINO N., KÖBLER J., ANDRÄ H., WELSCHINGER F., MÜLLER R., SCHNEIDER M.: *Accounting for viscoelastic effects in a multiscale fatigue model for the degradation of the dynamic stiffness of short-fiber reinforced thermoplastics*, Computational Mechanics, Vol. 71, 2023, 493–515, <https://doi.org/10.1007/s00466-022-02246-y>
- [20] DEMIRAL M., OTKUR M.: *From Mechanics to Machine Learning in Additive Manufacturing: A Review of Deformation, Fatigue, and Fracture*, Technologies, Vol. 14, No. 4, 2026, 218, <https://doi.org/10.3390/technologies14040218>
- [21] VAN BAELE S., KERCKHOFFS G., MOESEN M., PYKA G., SCHROOTEN J., KRUTH J.P.: *Micro-CT-based improvement of geometrical and mechanical controllability of selective laser melted Ti6Al4V porous structures*, Materials Science and Engineering A, Vol. 528, No. 24, 2011, 7423–7431, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.06.045>
- [22] ISO 13314: *Mechanical testing of metals — Compression test for porous and cellular metals*, International Organization for Standardization, Geneva, 2011.
- [23] YAN C., HAO L., HUSSEIN A., RAYMONT D.: *Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 62, 2012, 32–38, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.06.002>
- [24] DE LEON E., VILLA R., RIENSCHKE A., BEVANS D. D., BILLINGS C., WATERMAN J., SIDDIQUE Z., LIU Y.: *Part scale prediction of residual stress through thermomechanical modeling of additively manufactured Ti-6Al-4V*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 144, 2026, 8089–8114, <https://doi.org/10.1007/s00170-026-18300-5>
- [25] FU C. H., GUO Y. B.: *Three-Dimensional Temperature Gradient Mechanism in Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 136, No. 6, 2014, 061004, <https://doi.org/10.1115/1.4028539>
- [26] ZHANG C., JIN G., YE T., ZHANG Y.: *Harmonic response analysis of coupled plate structures using the dynamic stiffness method*, Thin-Walled Structures, Vol. 127, 2018, 402–415, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.02.014>
- [27] LI H., ZHANG T., LI Z., WEN B., GUAN Z.: *Modeling of the nonlinear dynamic degradation characteristics of fiber-reinforced composite thin plates in thermal environment*, Nonlinear Dynamics, Vol. 98, No. 1, 2019, 819–839, <https://doi.org/10.1007/s11071-019-05232-x>

ELEKTROMOS FRÖCCSÖNTŐGÉP ALKALMAZÁSA A MÉRNÖKI POLIMERTECHNOLÓGIAI ALAPISMERETEK EGYETEMI OKTATÁSÁBAN

APPLICATION OF AN ELECTRIC INJECTION MOLDING MACHINE IN UNIVERSITY EDUCATION OF BASIC ENGINEERING POLYMER TECHNOLOGY

Dr. Czégéni Csilla Enikő *, Hódos György**

ABSTRACT

We present the integration of Engel e-mac 180 electric injection molding machine into university engineering education. In addition to expanding students' practical knowledge, this implementation raises the standard of university education. It provides an opportunity for students to learn the parts of an industrial electric injection molding machine, the injection molding tool and their specific role in the molding cycle. Furthermore, they can operate the injection molding machine through programming the parameters of the molding cycle. While optimizing molding parameters, students can learn how to determine the gate freeze time and understand its importance in achieving perfect cavity filling. The injection molding of standard test specimens also offers opportunities for subsequent mechanical testing or hardness measurements of polymers with different structures (amorphous, semicrystalline). Finally, in order to promote environmental awareness, we propose studying environmentally friendly, energy-saving injection molding technologies by utilizing recycled plastics or bio-based polymers with this electric injection molding machine.

1. BEVEZETÉS

A műanyagok mára már az életünk nélkülözhetetlen részeivé váltak, amelyek nélkül a mindennapjaink elképzelhetetlenek lennének. Bár a mai környezettudatos szemléletmódban a műanyag szó gyakran „közellenségként” cseng, de gépészmérnöki szempontból pont ez teszi fontossá a polimertechnológiai alapismeretek bővítését: a probléma nem a műanyaggal van, hanem a szemlélettel, ahogy eddig kezeltük. A mikroműanyag-szennyezés és a környezetszennyezés nem a polimerek létezésének, hanem a nem megfelelő hulladékgazdálkodásnak a következménye. A fenntartható jövőhöz nem kevesebb műanyagra, hanem okosabb műanyag-felhasználásra és jól képzett mérnökökre van szükség. A fenntarthatóság alapja az, hogy minimalizáljuk a selejtet és egyre nagyobb

mennyiségben gyártsunk újrahasznosított- vagy bioalapú alapanyagokból.

Ennek a korszerű szemléletnek az elsajátításához elengedhetetlen a magas szintű gyakorlati oktatás. Mivel oktatási céllal kevés helyen áll rendelkezésre az iparban használt fröccsöntő gép, a hallgatók csak elméleti szinten, esetleg gyakorlati bemutatókon keresztül tanulnak a gyártástechnológiákról. Ha elérhetők is a számukra laboratóriumi berendezések azok általában kisméretűek, amelyek a korlátozott szerszám befogadó képességük miatt szintén kisméretű próbadarabok (pl. szakító próbatestek) előállítására alkalmasak, valódi ipari alkatrészek gyártására nem.

Jelentős mérföldkőnek tekinthető a Debreceni Egyetem Gépészmérnöki Tanszékén az Engel E-Mac 465/180 Fast Track elektromos fröccsöntő gép üzembehelyezése, ami egy rendkívüli gyakorlati lehetőséget nyújt a mérnökhallgatók számára. Az Engel gép precizitása három speciális szerszámon keresztül demonstrálható: az autóalkatrész-gyártó szerszámmal a valódi ipari gyártástechnológia szemléltethető, a szakítópróbatest-szerszámmal számszerűsíthetők az anyagtulajdonságok (pl. a szakítószilárdság), míg a spirál szerszámmal az ömledék áramlás-törvényszerűségei taníthatók. Ezek a gyakorlati tapasztalatok elősegítik, hogy a hallgatókból ne csak gépkezelők, hanem a folyamatokat is megértő és irányítani képes mérnökök legyenek. Képessé válnak arra, hogy akár az újrahasznosított darálékból vagy re-granulátumokból is kiváló minőségű terméket tervezzenek, majd gyártsanak.

A jövő fröccsöntése már nem csupán hatékony termelésről kell szólnon, hanem egyre inkább a fenntarthatóságot, az energiahatékonyságot kell előtérbe helyezni úgy, hogy a folyamatok biztonságosak és környezetbarátak is legyenek. A modern, elektromos vagy hibrid fröccsöntő gépek már jóval kevesebb energiát fogyasztanak, mint a hagyományos hidraulikus berendezések. Emellett fontos szerepet kell kapjon az újrahasznosított műanyagok arányának növelése a gyártásban, a biopolimerek (pl. politejsav, cellulóz) szélesebb körű alkalmazása, alacsony karbonlábnyomú adalékanyagok használata, komposztálható vagy

*egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

** tanszéki mérnök, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

környezeti körülmények között rövid idő alatt lebomló termékek fejlesztése. Ezek a lépések mind kulcsszerepet játszanak abban, hogy a fröccsöntés hosszú távon gazdaságos, de mégis környezetbarát és versenyképes maradjon.

2. A FRÖCCSÖNTŐ GÉP FELEPÍTÉSE, A FRÖCCSÖNTÉS FOLYAMATÁNAK ELMÉLETI ÁTTEKINTÉSE

A fröccsöntés egy szakaszos műanyagfeldolgozási technológia, amely során a műanyag granulátumot olvadáspontja felé melegítve ömledék állapotba hozzák, majd az így kapott kis viszkozitású ömledéket nagy nyomással, egy szűk beömlőnyíláson a kívánt formára kialakított zárt, fémből (acél, alumínium) készült szerszámba fecskendezik. A szerszámban az ömledék a hűtés hatására megszilárdul és elnyeri végleges alakját [1].

A fröccsöntő gép fő részei [2]: a plasztifikáló- és fröccsegység (fröccsagregát), a szerszámozáró egység és a vezérlőegység (1. ábra). A szerszámot valójában azért nem soroljuk a fő egységek közé, mert egy fröccsöntő gép több szerszámmal is használható valamint egy szerszám több gépen is felhasználható. A fröccsöntésben használt alapanyagok hőre lágyuló polimerek, amelyek a kívánt színre (ún. mesterkeverékekkel) színezhetők vagy mechanikai tulajdonságaik javítása érdekében más adalékokkal tölthetők [3].



1. ábra: Az Engel E-Mac 465/180 Fast Track elektromos fröccsöntő gép

A fröccsöntési folyamat a szerszám zárásával veszi kezdetét. Ezt követően kialakul a záróerő (a fröccsöntő gép egyik legfontosabb jellemzője), amely a két szerszámfél tökéletes zárását biztosítja, úgy, hogy a magas nyomással beáramló polimer ömledék ne hogy szétfeszítse a szerszámot.

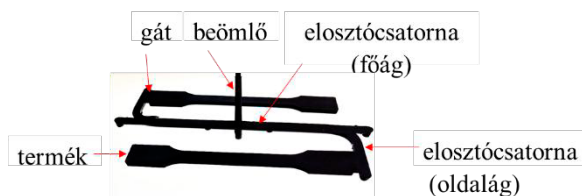
A fröccsöntési ciklus több elkülöníthető szakaszra bontható amint az a 2. ábrán látható: szerszámozárás, fröccsöntés, utónyomás, hűtés/plasztifikálás, szerszámnyitás/kidobás. Összefoglalva a ciklust, a szerszámfelek összezárása után, a plasztifikáló egység (a fröccsagregát, amely magába foglalja a csigát, a hengert és a hozzájuk tartozó egyéb alkatrészeket) előre mozdul, és a fúvóka csatlakozik a szerszámmal. Ezt követően a csiga forgás nélkül, gyorsan előre lendül, és befroccsönti az anyagot a szerszámba. A szerszám teljes kitöltése után

megkezdődik az utónyomás, amely során további anyagot juttatnak a szerszámba a zsugorodás ellensúlyozására. A szerszám kinyitása után a fröccsegység hátrafelé mozdul, majd újra elindul a csiga forgása, és megkezdődik a plasztifikálás, mindeközben a termék a szerszámban hűl. A hűtési idő lejártával a szerszám kinyílik, és a késztermék eltávolítható.



2. ábra: A fröccsöntési ciklus [4]

A szerszám bezárása után a ciklus ismétlődik, a fröccsegység újra rázár a szerszámmal. A késztermék eltávolítása a szerszámüregből többnyire a kidobó tűskék segítségével történik. A kilövő rendszer mellett nagyon fontos szerepe van a beömlőnek ami lehet hideg vagy melegcsatornás, fő részei: a beömlő csatorna, az elosztó csatornák és a gátak (3. ábra). A szerszám termék üregébe a műanyag ömledék a gáton keresztül jut be, ami az elosztó csatorna beszűkülő része. Beszélhetünk direkt meglövésről (ilyenkor nem használunk gátat) vagy lehet standard-, film-, legyező-, esernyő-, küllő- és alagút a gát típusa.



3. ábra: Egy hidegcsatornás fröccsöntő szerszám beömlőrendszerének felépítése

Fröccsöntés során egy-egy terméken számos hiba jelentkezhet, amelynek típusai és okai nagyon sokfélék és összetettek lehetnek, ezek visszavezethetők a nem megfelelő fröccsöntési paraméterekre, az alapanyagokra vagy a fröccsöntő szerszámmal. Beszélhetünk geometriai eltérésekről (amikor a termék mérete, alakja tér el a tervezettől) vagy esztétikai hibákról (ezek a termék megjelenését vagy akár a mechanikai tulajdonságait is befolyásolhatják). A fröccsöntött műanyagtermékek esetén a kiindulási anyag és adalékok aránya, a polimer megolvasztásához szükséges hőmérséklet, a nyomás, az utónyomás, a hűlési idő, az utónyomási idő és plasztifikálás paraméterei is mind hatással van a termék minőségére.

3. A FRÖCCSÖNTŐ GÉP INTEGRÁLÁSA A GYAKORLATI OKTATÁSBA

3.1. Az optimális fészekkitöltés és átkapcsolási pont meghatározása, pecsételődési pont megállapítása az autóalkatrész gyártásakor

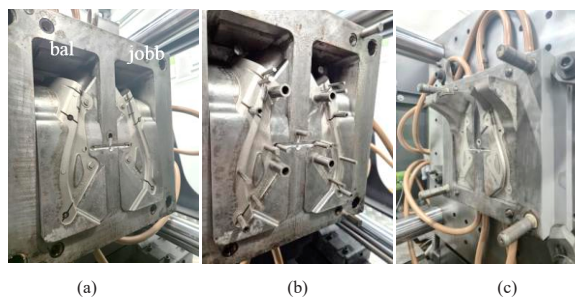
Cél: Egy konkrét alkatrész gyártása (autó lökhárító rögzítő elem) a technológiai paraméterek szisztematikus változtatásával. A hallgató megkeresi az ideális átkapcsolási pontot utánnomás alkalmazása nélkül, a kétfészkés szerszám esetén vizsgálja a fészkek közötti különbséget is, majd meghatározza a pecsételődési pontot. Különböző alapanyagok viselkedésének vizsgálata ugyanazzal a szerszámmal.

Amikor a hallgatók az autóalkatrészt gyártják, megtanítjuk nekik, hogy a precíz fészekkitöltés és a tökéletes utánnomás-beállítás kulcsfontosságú. A hallgatók megtanulják azt is, hogyan állítsák be úgy az utánnomást, hogy a termék éppen annyi anyagot tartalmazzon, amennyi a szerkezeti integritáshoz kell. Az autóiipari fröccsöntött rögzítő elem mindkét oldali képe látható a 4. ábrán.



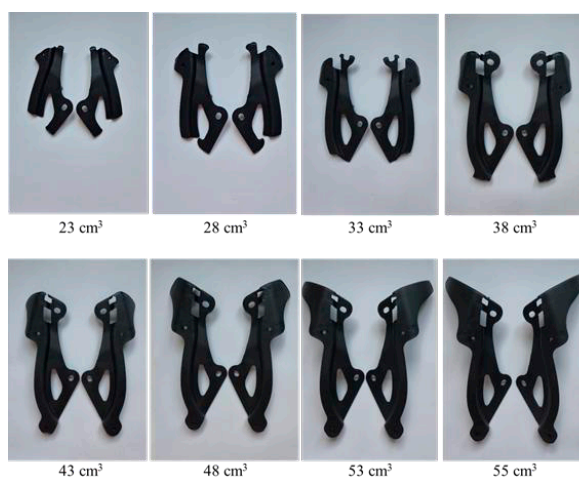
4. ábra: Az autóiipari fröccsöntött rögzítő termék mindkét oldali képe

A polipropilén (PP) kiválóan alkalmas oktatási célú fröccsöntéshez, mivel költséghatékony alapanyag, feldolgozása egyszerű, nem igényel sem magas hőmérsékletet, sem speciális tárolást, szárítást. Mechanikai tulajdonságai megfelelőek az egyszerűbb alkatrészek gyártásához, ugyanakkor lehetőséget biztosítanak olyan jelenségek szemléltetésére is, mint a zsugorodás, beszívódás vagy az áramlási vonalak kialakulása. A vizsgálatok célja a fröccsöntött, PP alapanyagú lökhárítótartó elemek gyártási paramétereinek optimalizálása, különös tekintettel az átkapcsolási térfogatra, az utánnomásra és az alkalmazott PP alapanyag tulajdonságaira. Az alkalmazott szerszám egy+egy fészkes hidegsatornás autóalkatrész (első lökhárító tartó elem) fröccsöntő szerszám. A szerszám bélyeg és csésze oldala látható az 5. ábrán. Ez a fajta szerszámalkalítás a jobb és bal oldali alkatrészek egyidejű gyártását teszi lehetővé, ami azért előnyös, mert mindkét darab azonos feldolgozási körülmények között egyszerre készül el.



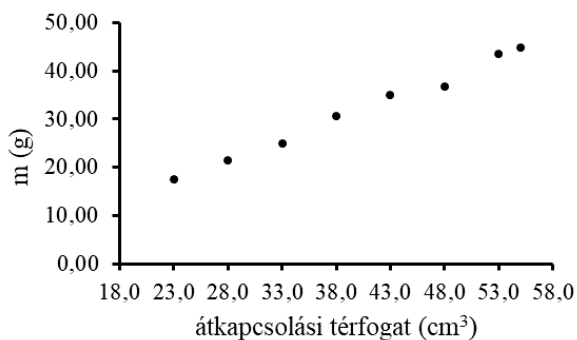
5. ábra: Fröccsöntő szerszámrészek bemutatása: (a) kimozdítás nélküli-, (b) előretolt kilökökkel a bélyeg oldal, (c) csésze oldal

A kitöltés vizsgálat demonstrálásához az átkapcsolási térfogatokat 23 cm^3 és 55 cm^3 között változtattuk, majd a fröccsöntött termékek tömegét digitális táramérlegen lemértük.



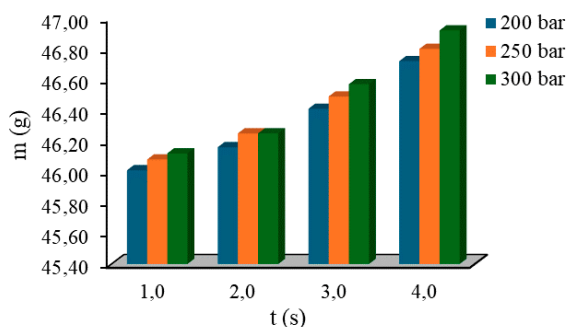
6. ábra: Az optimális átkapcsolási térfogat meghatározásához készített mintadarabok képei

Az átkapcsolási térfogat változtatásának hatását vizsgáltuk a fröccsöntött darabok tömegére és a szerszám kitöltésére. A 6. ábrán a különböző beállításokkal készült mintadarabok láthatóak. Megfigyelhető a fokozatos kitöltés: alacsonyabb adagolási térfogatnál ($23\text{--}43 \text{ cm}^3$) a darabok még hiányosak („short shot”), nagyobb adagolási térfogatnál ($48\text{--}55 \text{ cm}^3$) az alkatrészek szemrevételezés alapján már teljesnek tűnnek. A kapott adatok szemléletessé tehetők a tömeg átkapcsolási térfogat függvényében történő ábrázolásával. A 7. ábra grafikonján látható, hogy az átkapcsolási térfogat növelésével a darabok tömege nő. Általában azt a pontot keressük, ahol a szerszámműreg kb. 95-98%-ig telik meg volumetrikusan, majd a maradékot és a tömörítést már az utánnomás végzi.



7. ábra: Az átkapcsolási térfogat és az alkatrész tömege közötti összefüggés

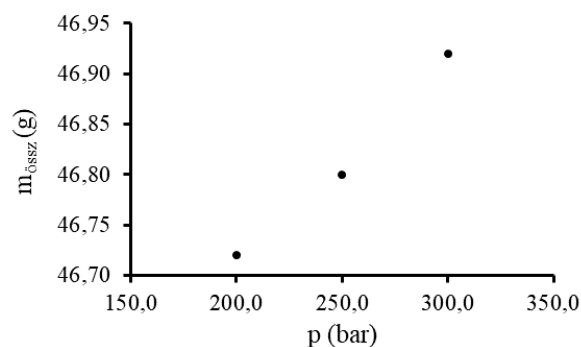
A 8. ábra azt mutatja, hogyan változik a fröccsöntött darab tömege a különböző növekvő utónyomás értékek (200, 250 és 300 bar) alkalmazásakor az utónyomás időtartamának függvényében. Jól látható, hogy mindhárom nyomáson a termék tömege növekszik az utónyomás idő növelésével, mivel hosszabb ideig van lehetőség a fajtérfogat csökkenés kompenzálására. Megfigyelhető, hogy az utónyomás növelése nagyobb termék tömeget eredményez azonos időtartam alatt, a 300 bar utónyomással gyártott darabok tömege pedig a legnagyobb. Ez arra utal, hogy a nagyobb utónyomás hatékonyabban képes kompenzálni a hűlés közbeni zsugorodást.



8. ábra: A tömeg változása az utónyomás idő és nyomás függvényében

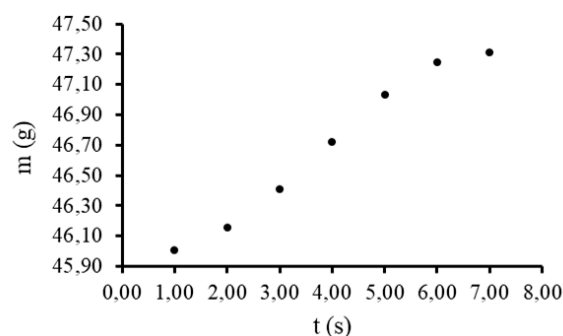
A 9. ábrán láthatjuk, hogy négy másodperc utónyomás idő alkalmazásakor az utónyomás nagysága hogyan befolyásolja a fröccsöntött termék tömegét. A mérési eredmények egyértelmű emelkedő trendet mutatnak, a nyomás növelésével a mintadarab tömege folyamatosan nő. Mivel 300 bar nyomáson a terméken egyre nagyobb a sorja, ezért 250 bar utónyomás alkalmazása elegendő.

Az utónyomás idő vizsgálatának jelentősége azért fontos, hogy meghatározzuk segítségével a lepecsételődési pontot, ugyanis ez minél később következik be annál tovább érvényesíthetjük az utónyomás hatását, aminek zsugorodás csökkentő szerepe van. Lepecsételődés után a műanyag ömledék megszilárdul, így már nem tudunk több anyagot a szerszámba juttatni, nem nő tovább a termék tömege.



9. ábra: A fröccsöntött autóalkatrész tömegének változása különböző utónyomásoknál 4 s utónyomás idővel

Az utónyomás idő változtatásakor az utónyomást 250 bar-ra állítottuk. A 10. ábrán látszik, hogy 7 s után a mérési pontjainkra illeszthető görbe ellaposodik, telítésbe megy át. Ez azt jelzi, hogy a beömlőnyílás (gát) megfagyott, így további anyag már nem tud bejutni a szerszámba.



10. ábra: Az utónyomás idő hatása a mért tömegre 250 bar utónyomást alkalmazva

3.2. Termékminőség ellenőrzés, hibaanalízis az autóalkatrészen

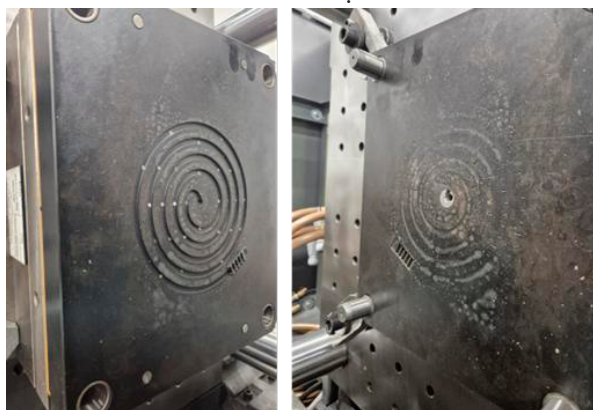
Cél: A gyakori fröccsöntési hibák (összecsapás, zsugorodás, vetemedés, beégés, beszívódás) azonosítása és okainak feltárása.

A jelenleg rendelkezésre álló autóalkatrész szerszám alkalmas bizonyos fröccsöntési hibák analizálására, azok szándékos generálásával. A mechanikai igénybevételnek való megfelelés mellett sok esetben nagyon fontos a termék esztétikája, felületi megjelenése, ezeknek a hibáknak a feltárása és az okok felderítése, hogy a hiba mihamarabb megszüntethető legyen. Ezek a hibák adódhatnak az alapanyagból, a technológiából, a szerszám kialakításból. A fröccsöntött darabok elkészítése után a hallgatók feladata a termékminőség ellenőrzése, hibaanalízis. Fröccsöntés után a tanulók különféle fröccsöntési hibákat vizsgálhatnak, például: hiányos termék, sorja képződés, diesel hatás, összecsapási vonalak, beszívódás, zsugorodás, vetemedés.

3.3. A műanyagok folyási tulajdonságainak tanulmányozása spirál szerszámban

Cél: A különböző műanyag alapanyagok reológiai tulajdonságainak jellemzése, az anyagminőség összehasonlítása.

A műanyagok viszkozitásának mérését általában folyásindex mérővel (MFI) végzik. A hallgatók a gyakorlat keretein belül a műanyag ömledék folyásindex mérése mellett az ömledék áramlását spirál szerszámba történő fröccsöntéssel jellemezhetik, mérik a megdermedésig megtett távolságot. A rendelkezésünkre álló, az olvadék folyási hosszának meghatározására alkalmas spirál szerszám képe látható a 11. ábrán.



11. ábra: A spirál szerszám bélyeg és csésze oldala

A spirál folyási teszt a műanyagiparban használt vizsgálati módszer, ahol az ömledék spirál alakú pályán való áramlási hosszát mérik. A spirál az egyik leghasznosabb diagnosztikai eszköz a fröccsöntésben a folyási tulajdonságok vizsgálatára. Megmutatja, hogy egy adott műanyag mennyire jól folyik és hogyan tölti ki a szerszámműreget. Ezt a típusú szerszámot, kifejezetten oktatási és anyagvizsgálati célokra használják amivel a műanyag ömledék áramlási úthosszát (folyóképességét) mérik adott nyomás és hőmérséklet mellett [5]. Kiválóan alkalmas a különböző alapanyagok (pl. PP vs. PA6) feldolgozhatósági különbségeinek tanulmányozására. A spirál méretei, hossza, átmérője befolyásolják, azt hogy milyen lesz a kitöltés, amiből az olvadék folyóképességére következtethetünk. A különböző fröccsöntési paraméterek, amelyek hatással vannak a polimer viszkozítására, mint pl. anyaghőmérséklet, fröccsnyomás, szerszámhőmérséklet hatása is tanulmányozható egy ilyen szerszámban vagy jellemezni tudjuk az alapanyag minőségét.



12. ábra: Spirál folyási PP próbatestek

A 12. ábrán a jobb oldali képen a fekete PP próbatesten láthatjuk, meddig jutott el az anyag a spirálban (mm-ben), mielőtt a hűlés miatt megdermedt volna. Míg az ábra bal oldalán jól látható a fröccsöntött spirál próbatest a főcsatornával együtt, ezen is azonosítható a dermedési pont.

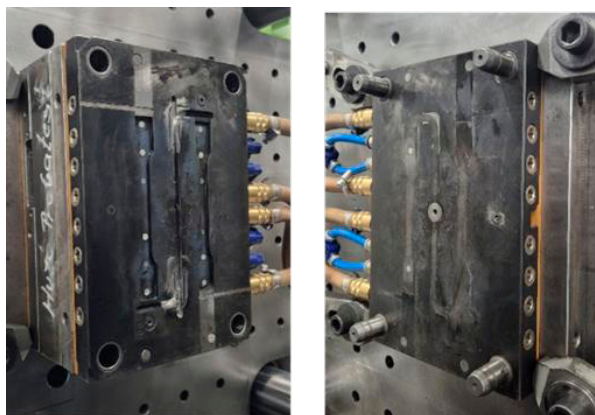
MFI = 13 g/min				
210 °C	230 °C	250 °C	270 °C	
220 mm	290 mm	320 mm	380 mm	

MFI = 30 g/min				
210 °C	230 °C	250 °C	270 °C	
290 mm	320 mm	380 mm	420 mm	

13. ábra: A hőmérséklet emelésének hatása a fröccsöntött spirál hossza két különböző folyásindexű polipropilén alapanyag esetén

Az újrahasznosított anyagok folyási tulajdonságai gyakran mutatnak ingadozást. A hallgatók az spirál segítségével mérhetik, mennyiben tér el egy gyári alapanyag és például egy 30%-ban újrahasznosított keverék reológiája, és hogyan kell a gép paramétereit (pl. utónyomás profilt) módosítani ahhoz, hogy a termék minősége (és így a karbonlábnyoma is) optimális maradjon. Két különböző folyásindexű (MFI = 13 és 30 g/min) polipropilén alapanyagból készítettünk spirál próbadarabokat négy különböző feldolgozási hőmérsékletet alkalmazva (13. ábra). Az első anyag (MFI = 13 g/min) nehezebben folyik azonos körülmények között. Mindkét anyagnál egyértelműen látszik (13. ábra), hogy a hőmérséklet emelésével a spirál hossza növekszik. A polimer láncok a magasabb hőmérsékleten könnyebben elmozdulnak egymáson, a viszkozitás csökken, így az ömledék messzebbre jut a szerszámban, mielőtt megdermedne. Látható, hogy a magasabb MFI lehetővé teszi az alacsonyabb hőmérsékleten történő feldolgozást vagy a bonyolultabb formák könnyebb kitöltését.

A 14. ábrán látható fröccsöntő szerszám szabványos szakító vizsgálatokhoz alkalmas próbatestek gyártására szolgál. Ez egy kétfészkés szerszám, ami azt jelenti, hogy egyetlen befecskendezési ciklusban egyszerre két darab szakító próbatestet állít elő.



14. ábra: Szakítópróbatest szerszám bélyeg és csésze oldala

A 15. ábrán pedig egy fröccsöntött polipropilén szakító próbatest képe látható felülnézetből, amin azonosítható a beömlő- és csatornarendszer. A főcsatorna ahol a gép a forró, képlékeny műanyagot befecskendezte. Az osztócsatornák: a vízszintes ágak, amelyek elosztják az anyagot a két fészék felé. A gát, az a szűk pont, ahol a csatorna és a próbatest találkozik, amit a gyártás után le kell választani (le kell törni vagy vágni) a kész termékről. Az így előállított próbatestek mechanikai tulajdonságok vizsgálatára alkalmasak.



15. ábra: Fröccsöntött szakító próbatest

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott elektromos fröccsöntő gép és a rendelkezésre álló fröccsöntő szerszámok alkalmazásával a feladatok elvégzésével a hallgatók betekintést nyerhetnek a fröccsöntés technológiájába, megismerhetik a gépkezelést, az optimális fröccsöntés beállításait, a megjelenő hibákat és azok okait valamint elkerülési lehetőségeit. A spirál szerszámmal a műanyag alapanyagok reológiai tulajdonságai tanulmányozhatók, a szakító próbatest szerszám pedig a polimerek mechanikai tulajdonságainak vizsgálatához szükséges próbatestek gyártására ad lehetőséget.

5. SUMMARY

Utilization of presented electric injection molding machine and the available molds, students can gain insight into injection molding technology, machine operation, process optimization, as well as the machine operation, optimal process settings, common defects, their causes, and ways how to prevent them. The spiral mold allows the characterization of the rheological properties of plastic raw materials, whereas the tensile specimen mold enables the production of specimens required for testing the mechanical properties of polymers.

6. IRODALOM

- [1] L. Macskási, G. Czél, C. Érseki, G. Falk, L. Molnár, Műanyagok fröccsöntésének elmélete és gyakorlata, Sunplant Kft., Miskolc, 2024.
- [2] A. Szűcs, F. Ronkay, R. Boros, J. Györgyi, Fröccsöntés Mesterfokon, Cavity Eye Hungária Kft, Kecskemét, 2025.
- [3] T. Czvikovszky, J. Gaál, P. Nagy, A polimertechnika alapjai, Műegyetemi kiadó, 2007.
- [4] Y. Wang, C. Lee, Design and Optimization of Conformal Cooling Channels for Increasing Cooling Efficiency in Injection Molding, Appl. Sci. 13 (2023) 7437. <https://doi.org/10.3390/app13137437>.
- [5] D. Chalicheemalapalli Jayasankar, T. Tröster, T. Marten, Optimizing Injection Molding Tool Design with Additive Manufacturing: A Focus on Thermal Performance and Process Efficiency, Materials 18 (2025) 571. <https://doi.org/10.3390/ma18030571>.

POLIMER SZENDVICSSZERKEZETEK MEZOMODELLEZÉSE MESO MODELLING OF POLYMER SANDWICH STRUCTURES

File Máté*, Kállai Imre**, Dr. Huri Dávid***, Dr. Mankovits Tamás****

ABSZTRAKT

A cikkben egy polimer szendvicsszerkezet hajlítóvizsgálatának végeselemes modellezését mutatjuk be direkt mezoléptékű és homogenizált makroléptékű modell felhasználásával. Kutatásunk fő célja két modellezési módszer megbízhatóságának és hatékonyságának vizsgálata. Az összehasonlítás során a tömegértékekben nem tapasztaltunk eltérést, amely bizonyítja a geometria helyességét. A reakcióerő értékek minimális eltérést mutattak, amely elfogadható, mivel homogenizált makromodell alkalmazásával a szimulációs időt 78%-kal le tudtuk csökkenteni. Ez a módszer szintén lehetőséget nyújt több különböző magszerkezet vizsgálatára, amely egy jövőbeli kutatási lehetőség.

ABSTRACT

In this work, the finite element modelling of a polymer sandwich structure was performed under a three-point bend test. The modelling was done using direct meso scale and homogenized macro scale modelling approaches. The main goal of our research was to compare the reliability and efficiency of the two modelling approaches. During the comparison, no error was found in the weight values, proving that the geometries were correct. The reaction force values showed minimal deviation, which is acceptable, since the run time of the simulation was reduced by 78% through the use of the homogenized macro model. This approach also enables the simulation of multiple different core structures, which is a future research possibility.

1. BEVEZETÉS

A könnyűszerkezetes tervezésben egyre nagyobb igény mutatkozik olyan teherhordó szerkezetek iránt, amelyek nagy merevséget és szilárdságot kis tömeggel és hatékony anyagfelhasználással ötvöznék. A szendvicsszerkezetek e követelményeknek két viszonylag merev fedőréteg és az azokat elválasztó könnyű magszerkezet alkalmazásával felelnek meg az 1. ábrán látható rétegrendben. Az additív gyártás összetett cellás geometriák előállítását teszi lehetővé, így a mag topológiája és geometriai paraméterei az adott

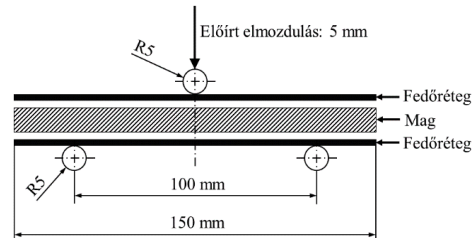
mechanikai követelményekhez igazíthatók. A megnövekedett geometriai tervezési szabadság ugyanakkor jelentősen megnöveli a lehetséges konstrukciók számát, ezért azok hatékony vizsgálata és optimalizálása megfelelő numerikus modellezési eljárások alkalmazását igényli.

A cellás szerkezetű mag geometriájának reprezentációjára alapvetően makro- és mezoléptékű numerikus modellek alkalmazhatók. A makroléptékű modellekben a cellás szerkezetet egy homogenizált ortotrop ekvivalens folytonos közeggel helyettesítik. Ez a megközelítés alkalmas a szerkezet globális mechanikai válaszáinak meghatározására, miközben alacsonyabb számítási költsége miatt nagyobb szerkezeti modellek hatékony elemzését is lehetővé teszi [1]. Ezzel szemben a direkt mezoléptékű modellekben a mag cellás geometriáját explicit módon reprezentálják, így képesek leírni a helyi deformációs mechanizmusokat is. Nagyobb számítási költség mellett azonban lehetővé teszik a lokális deformációs mechanizmusok részletesebb vizsgálatát [2], [3].

A jelen kutatás célja additív gyártással előállítható, termoplasztikus cellás magszerkezetű szendvicspanelek direkt mezo- és homogenizált makroléptékű modellezési megközelítésének összehasonlítása hárompontos hajlítóvizsgálat numerikus modellezésével, különös tekintettel a globális mechanikai válasz reprodukálhatóságára és a számítási hatékonyságra.

2. MODELLEZÉSI FELADAT BEMUTATÁSA

A hárompontos hajlítóvizsgálat numerikus modelljét az ISO 14125 követelményeinek megfelelően építettük fel, azonban a szendvicsszerkezet eltér a szabványos méretektől. A próbatest szélessége esetünkben 25 mm volt, a további méretek az 1. ábrán láthatóak.



1. ábra A modellezett szendvicsszerkezet hárompontos hajlítóvizsgálatának felépítése

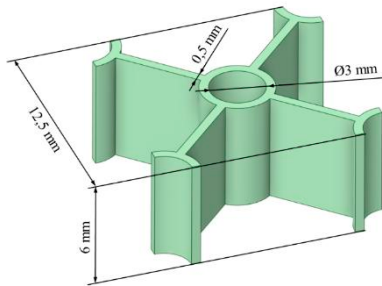
* PhD hallgató, Debreceni Egyetem, Pekár Imre Gépészeti Tudományok Doktori Iskola

** mérnökségvezető, Diehl Aviation Hungary Kft.

*** egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

**** egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

A fedőrétegek vastagsága 0,75 mm, a magszerkezet egy egységcellájának felépítése pedig a 2. ábrán látható.



2. ábra A magszerkezetet felépítő egységcella méretei

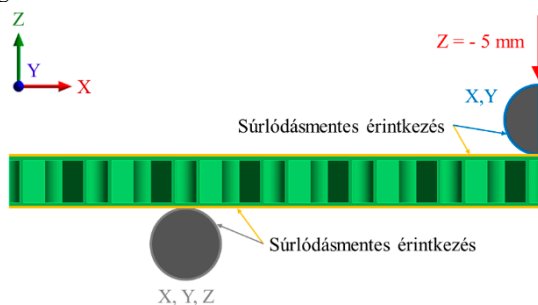
3. DIREKT MEZOLÉPTÉKŰ MODELLEZÉS

A végeleemes modellt az Ansys 2025 R2 szoftver Mechanical moduljában építettük fel. Az alapanyag mechanikai viselkedésének leírására izotróp, lineárisan rugalmas anyagmodellt alkalmaztunk (Ansys Granta, Plastic PA6), melynek anyagparaméterei az 1. táblázatban láthatóak.

1. táblázat Az izotróp, lineárisan rugalmas anyagmodell paraméterei

Rugalmassági modulus [MPa]	1111
Poisson-tényező [-]	0,35
Nyírási rugalmassági modulus [MPa]	411
Sűrűség [kg/m ³]	1140

A feladat jellegéből adódóan továbbá a szimulációs idő minimalizálása miatt a próbatestet negyedmodellé egyszerűsítettük, a kényszereket, illetve a terhelést is ennek megfelelően adtuk meg. A hajlítöhengereket ideálisan merev elemekkel modelleztük. Az 5 mm-es előírt elmozdulást a felső, mozgó hajlítöhengeren adtuk meg, míg a terheléstől eltérő irányokban az elmozdulás szabadságfokokat lekötöttük. Az alsó hengeren az összes szabadságfokot lekötésre került. A szimmetriasíkokkal egybeeső csomópontok síkra merőleges szabadságfokait gátoltuk. A hajlítöhengerek és a próbatest közé súrlódásmentes kapcsolatot írtunk elő, „Adjust to touch” kezdeti érintkezési beállítással és „Augmented Lagrange” számítási formulával. A felépített végeleemes modell a 3. ábrán látható.



3. ábra A felépített direkt mezomodell az érintkezésekkel, kényszerekkel és a terheléssel

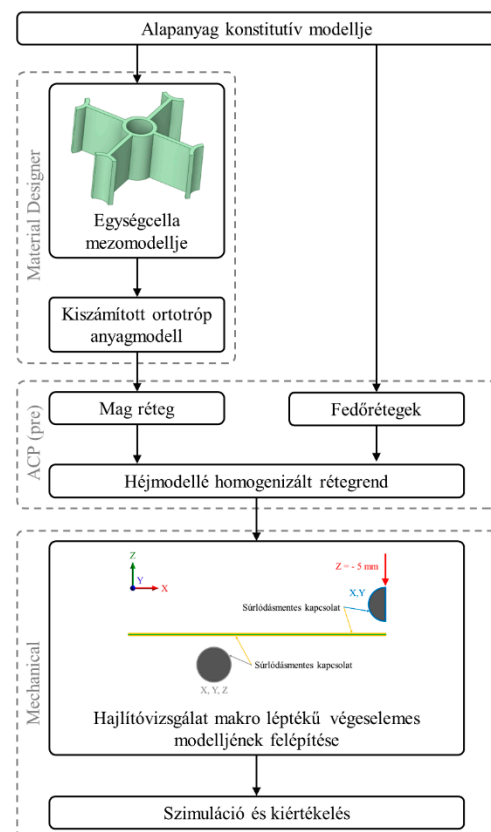
A végeleemes hálózást a 2. táblázatban bemutatott beállításokkal végeztük. A vizsgált globális erő-elmozdulás válasz alacsony hálózérkenysége miatt külön hálókongruencia-vizsgálatot nem végeztünk. Az elemméretet úgy választottuk meg, hogy a legkisebb geometriai méret mentén is legalább két elem keletkezzen.

2. táblázat A mezomodell diszkretizációs jellemzői

Elem típusa, alakja	Térfogati, tetraéder
Elem csomópontjainak száma	10 db
Elem mérete (szendvicsszerkezet)	0,2 mm
Elem mérete (hajlító henger)	1 mm

4. HOMOGENIZÁLT MAKROLÉPTÉKŰ MODELLEZÉSI

A homogenizált makromodell a szendvicsszerkezet felépítését nem veszi explicit módon figyelembe, hanem annak ekvivalens mechanikai viselkedését egy tömör kontinuummal írja le. A viselkedés leírásához egy több lépésből álló, egységcellán alapuló homogenizálási eljárást alkalmaztunk, melynek eredményét a makroléptékű végeleemes modell anyagmodellként hívta meg. A teljes homogenizált makromodellel történő eljárás folyamatábrája az 4. ábrán látható.



4. ábra A hajlítóvizsgálat homogenizált makromodellel történő modellezésének folyamatábrája

A homogenizált makromodellezési eljárásához az Ansys 2025 R2 Material Designer és ACP (pre) modulokat használtuk. A geometriát három részre bontottuk, két fedőrétegre és a mag geometriára, amelyet a Material Designer modulban mezoléptékben modelleztünk a 2. ábrán látható geometriának megfelelően. Az egységcella végeselemes szimulációjához a test direkt mezomodellnél alkalmazott anyagmodellt használtuk fel (1. táblázat), valamint a 3. táblázatban található elemekkel hálóztuk.

A Material Designer modul az egységcellán hat különböző terhelési esetet modellez, amelyek eredményeiből meghatározható a mag szerkezeti felépítésének hatását ekvivalens tömör kontinuummal helyettesítő, ortotróp lineárisan rugalmas anyagmodell.

3. táblázat Az egységcella diszkretizációs jellemzői

Elem típusa, alakja	Térfogati, tetraéder
Elem csomópontjainak száma	10 db
Elem mérete (egységcella)	0,2 mm

Az elemméret kiválasztásához több különböző elemméret segítségével is lefuttattuk a szimulációt, majd azt a legkisebb elemméretet választottuk ki, amely a lehető legkisebb elemméret értékéhez képest kevesebb, mint 1% eltérést mutatott. A hálókonzvergencia vizsgálat eredményeit a 4. táblázat mutatja. A 0,5 mm-től nagyobb elemméret alkalmazása a geometria kis falvastagsága miatt nem volt lehetséges, a 0,1 mm-től kisebb elemméret esetében pedig a rendelkezésre álló 32 GB memória nem volt elegendő.

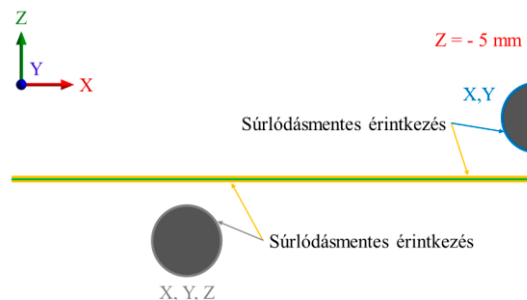
4. táblázat Az egységcella hálókonzvergencia vizsgálata

Elem mérete	X irányú rugalmassági modulus	Eltérés
[mm]	[MPa]	[%]
0,5	1,558	+6,40
0,25	1,485	+1,49
0,2	1,476	+0,88
0,15	1,469	+0,41
0,1	1,463	Referencia

A rétegrendet az ACP (pre) modulban építettük fel. A két 0,75 mm vastagságú fedőréteghez az 1. táblázatban található lineárisan rugalmas anyagmodellt használtuk fel, a 6 mm magas maghoz pedig az egységcellán kiszámított ortotróp anyagmodellt társítottuk. A modul segítségével ezután egyetlen héjmodellé homogenizáltuk a szendvicsszerkezet geometriáját.

A hárompontos hajlítóvizsgálat modellezését a direkt mezomodellel esetéhez hasonlóan az Ansys 2025 R2 Mechanical modulban végeztük el. Ebben az esetben is negyedmodellt alkalmaztunk, a szendvicsszerkezet geometriáját egyetlen felülettel modelleztük, míg a

hajlítóhengereket a korábban bemutatott módon testmodellként. A kényszerek, a terhelés és a kapcsolatok szintén a testmodellen bemutatott módon kerültek megadásra. A szimmetriakényszerek megadásakor ebben az esetben az XZ síkkal párhuzamos szimmetriasík mentén csak a síkra merőleges elmozdulás szabadságfokokat kötöttük le, míg az YZ irányú szimmetriasík esetében az elmozdulás mellett az Y tengely körüli elfordulást is gátoltuk. A súrlódásmentes kapcsolat beállításakor figyelembe vettük a héjelemeken megadott 7,5 mm-es vastagságot és 4 mm-es keresési sugarat adtuk meg. A felépített végeselemes makromodellel az 5. ábrán látható.



5. ábra A felépített makromodellel az érintkezésekkel, kényszerekkel és a terheléssel

A felhasznált háló tulajdonságai pedig az 5. táblázatban láthatóak. A hajlítóhengerek esetében a direkt mezomodellel bemutatott hálót alkalmaztuk. Mivel ebben az esetben is a kiértékelés során csak az erő-elmozdulás összefüggést vizsgáltuk, így a hálókonzvergencia vizsgálat elvégzése nem volt indokolt.

5. táblázat A makromodel diszkretizációs jellemzői

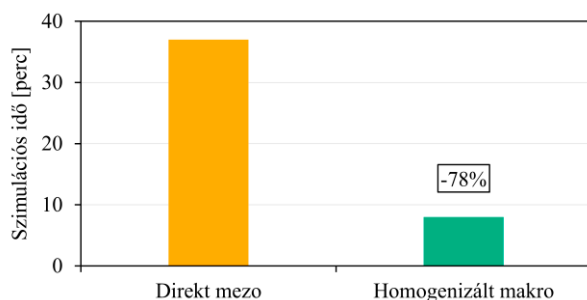
Elem típusa, alakja	Héj, négyszög
Elem csomópontjainak száma	8 db
Elem mérete (héjelem)	1 mm

5. A VÉGESELEMES SZIMULÁCIÓ ÉS AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA

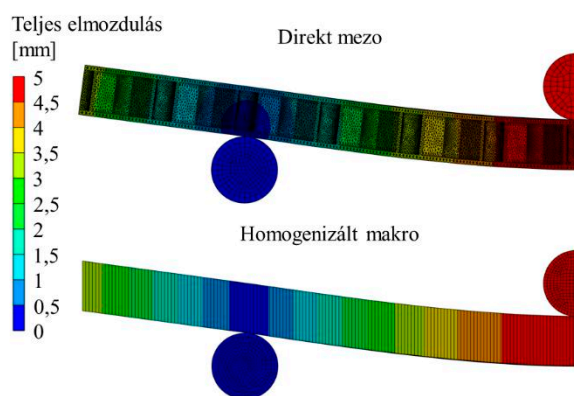
A szimulációt mindkét modell esetében nemlineáris megoldóval, 10 időlépcsőre bontva végeztük. A szimulációt egy Intel I5-11400f processzorral és 32 GB memóriával szerelt számítógépen végeztük. A szimulációk kiértékelésekor a szendvicsszerkezetek tömegére, az 5 mm-es lehajláshoz tartozó reakcióerőre, és a teljes szimulációs időre fókuszáltunk. Az eltérések számításakor a direkt mezomodellel értékeit használtuk referenciaként. Az eredményeket a 6. táblázat összegzi. A futtatási idő különbségét a 6. ábra szemlélteti. A 7. ábrán pedig a két modell deformált képe látható teljes elmozduláskontúrral.

6. táblázat A szimulációk eredményeinek összehasonlítása

Modellezési eljárás	Tömeg [g]	Reakció erő [N]	Futtatási idő [perc]
Direkt mezo	9,81	108,8	37
Homogenizált makro	9,81	108,4	8
Eltérés	0,00%	-0,37%	-78%



6. ábra A különböző modellezési eljárások számítási költsége



7. ábra A szimulációs modellek deformált képei elmozduláskontúrral

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben egy szendvicsszerkezet szimulációjának lehetőségeit mutattuk be direkt mezo és homogenizált makroléptékű modellezési eljárásokkal. A homogenizált makromodell felépítése lényegesen komplikáltabb, azonban a mag egységcellaként történő kezelése lehetővé teszi a geometriai paraméterek változtatását vagy a topológia egyszerű cseréjét.

A két modell összehasonlítása során a tömegre, a reakcióerőre és a szimuláció futtatási idejére fókuszáltunk. A tömegben látható teljes egyezés azt mutatja, hogy a homogenizálás során a geometria nem változott meg. A reakcióerő értékeiben minimális eltérés látható, a homogenizált makromodell által szolgáltatott érték 0,37%-kal kisebb, mint a direkt mezomodell értéke. A hiba mértéke a mérnöki gyakorlatban elfogadható,

főleg amennyiben figyelembe vesszük a 78%-os csökkenést a számítási időben.

Az egységcella alkalmazása lehetőséget nyújt több különböző magstruktúra hatékony modellezésére. Ennek bizonyítása egy jövőbeli kutatási lehetőség.

7. SUMMARY

In this article, the possibilities of simulating a sandwich structure via direct meso and via homogenized macro modelling approaches were showcased. The build-up of the homogenized macro model is significantly more complicated; however, the simplification of the core into a unit cell makes the exchange of the geometry simple.

During the comparison of the two models, we focused on the weight, the reaction force and the simulation runtime. The complete lack of error in the weight values signifies that the geometry did not change during the homogenization. The reaction force values showed minimal error. The values of the homogenized macro model were 0,37% smaller than the direct meso model. This error value is acceptable, especially if the 78% reduction in run time is taken into account.

The usage of the unit cell enables the efficient modelling of multiple different sandwich structures. The proof of which is a future research possibility.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM EKÖP-KDP-2025 KÓDSZÁMÚ EGYETEMI KUTATÓI ÖSZTÖNDÍJ PROGRAM – KOOPERATÍV DOKTORI PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT

9. IRODALOM

- [1] DERELI E., MBENDOU II J., PATEL V., MITTELSTEDT C.: Analytical and numerical analysis of composite sandwich structures with additively manufactured lattice cores, Composites Part C Open Access, Vol. 14, No. June, p. 100484, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100484>
- [2] SEEMANN R., KRAUSE D.: Numerical modelling of Nomex honeycomb sandwich cores at meso-scale level, Composite Structures, Vol. 159, pp. 702–718, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.071>
- [3] ANANDAN S., DHALI WAL G., GANGULY S., CHANDRASHEKHARA K.: Investigation of sandwich composite failure under three-point bending: Simulation and experimental validation, Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol. 22, No. 6, pp. 1838–1858, 2020, <https://doi.org/10.1177/1099636218791162>

INTEGRÁLT ADATKEZELŐ ÉS ANYAGMODELL-ILLESZTŐ RENDSZER GUMIK MECHANIKAI VIZSGÁLATÁHOZ

INTEGRATED DATA MANAGEMENT AND MATERIAL MODEL FITTING SYSTEM FOR MECHANICAL TESTING OF RUBBERS

Varga Tamás Antal*, Dr. Fazekas Bálint**, Dr. Mankovits Tamás***

ABSZTRAKT

A gumianyagok pontos anyagkarakterizálásához többféle kvázistatikus és dinamikus vizsgálat szükséges, amelyek jelentős mennyiségű mérési adatot eredményeznek. A Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszékén rendelkezésre áll a mérések elvégzéséhez szükséges laboratóriumi infrastruktúra és a megfelelő szaktudás. A nagyszámú mérési adat egységes feldolgozására kifejlesztettünk egy ún. Rubber Material Lab szoftvert, amely a mérési adatokat egy Instron anyagvizsgálógépből és egy Metravib DMA berendezésből standardizált formában importálja és kezeli. A szoftver lehetőséget biztosít a mérési adatok szerkesztésére, diagramon történő megjelenítésére és összehasonlítására, továbbá hiperelasztikus anyagmodellek illesztésére. Az illesztett modellparaméterek az Abaqus és az Ansys végelemes szoftverekkel kompatibilis formátumban közvetlenül exportálhatók.

ABSTRACT

For accurate material characterization of rubber materials, various quasi-static and dynamic tests are required, generating a substantial amount of measurement data. The laboratory infrastructure and research expertise required to perform these tests are available at the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen. To enable standardized processing of the large volume of measurement data, the Rubber Material Lab software was developed to import and manage Instron and DMA measurement data in a standardized format. The software enables measurement data to be edited, plotted, and compared, and also supports the fitting of hyperelastic material models. The fitted model parameters can be exported directly in Abaqus- and Ansys-compatible formats.

1. BEVEZETÉS

A gumialkatrészek mechanikai viselkedésének leírása és megfelelő anyagmodelljének meghatározása összetett feladat. A gumik nagy alakváltozásra képesek, mechanikai viselkedésük függhet a hőmérséklettől és a terhelési sebességtől, töltött gumikeverékek esetén pedig ciklikus terhelés hatására amplitúdófüggő lágyulás, az úgynevezett Payne-effektus is jelentkezhet. A nagy alakváltozás rugalmas viselkedésének leírására számos hiperelasztikus anyagmodell létezik, többek között a Mooney–Rivlin-, Ogden-, Yeoh- és Arruda–Boyce-modellek [1–7]. A viszkoelasztikus viselkedés, valamint a Mullins- és Payne-hatás leírásához további anyagtörvények alkalmazása szükséges [8–12]. Az ezekhez szükséges nagyszámú mérési adathalmaz feldolgozása jelentős időráfordítást igényel, különösen akkor, ha az adatok különböző forrásokból és formátumokban állnak rendelkezésre.

Gumik karakterizálása során jellemzően több terhelési esetben, több hőmérsékleten és különböző terhelési sebességeken végzünk vizsgálatokat, minden mérési esethez több próbatestet alkalmazva. A nyomóvizsgálatok eredményét az érintkező felületek kenési állapota is befolyásolhatja, ezért indokolt több peremfeltétel vizsgálata. A viszkoelasztikus tulajdonságok meghatározásához akár többrészes relaxációs mérésekre is szükség lehet. A frekvenciafüggő merevség vizsgálatához DMA (Dinamikus Mechanikai Analízis) méréseket szokás végezni. Mivel a mérési adatok több berendezésből és különböző exportformátumokban származhatnak, a feldolgozás során az eltérő adatszerkezetek és a ciklikus mérések automatikus felismerése is szükségessé válhat.

Ezen mérési adatok feldolgozására hoztuk létre a Rubber Material Lab névre hallgató szoftvert, amely segíti ezen adatok feldolgozását. A munkafolyamat során nem új anyagtörvényeket hozunk létre, hanem egyetlen felületen tudjuk elvégezni az adatok importálását,

* óraadó, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék varga.tamas@eng.unideb.hu

PhD hallgató, Debreceni Egyetem Pekár Imre Gépészeti Tudományok Doktori Iskola.

szimulációs mérnök, Robert Bosch Kft.

** adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék fazekas.balint@gt3.bme.hu

szimulációs mérnök, Robert Bosch Kft.

*** egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, tamas.mankovits@eng.unideb.hu

ellenőrzését, feldolgozását, összehasonlítását és végül az anyagmodell illesztését is, amelyet különböző végelemek szoftverekbe is képesek vagyunk exportálni anyagkártyaként. Ezen program célja az gumi anyagkártyájának előállításának automatizálása, illetve a mérési eredmények könnyebb utókövetése és egysítése.

2. KUTATÁSI ÉS LABORATÓRIUMI HÁTTÉR

2.1. Gumimechanikai kutatások a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszékén

A gumik végeselemes modellezése több mint egy évtizede van jelen a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszékének a mindennapjaiban. Mankovits Tamás és szerzőtársai elsőként gumiütközők végeselemes viselkedését vizsgálták, majd ezt követően tengelyszimmetrikus gumialkatrészek alakoptimalizálásával foglalkoztak [13-14]. Ezt követően Huri Dávid hiperelasztikus anyagmodelleket hasonlított össze. Ezen kívül válaszfelület-módszert alkalmazott autópári gumitermékek tervezésére, valamint elemezte a modellek pontosságát nyomóigénybevételre [15-17]. Ezek az eredmények rámutattak arra, hogy az alkalmazott anyagmodell és a bemeneti anyagadatok minősége jelentősen befolyásolhatja az optimalizálás megbízhatóságát. 2025-ös évben kezdte meg doktori tanulmányait Varga Tamás Antal, aki kormányművekben alkalmazott gumialkatrészek végeselemes vizsgálatával és optimalizációjával foglalkozik. A doktori kutatáshoz Fazekas Bálint ipari szakértőként kapcsolódott. Korábbi, Goda Tiborral közös munkájában olyan konstitutív modellezési keretet dolgoztak ki, amely a Mullins-hatást, a maradó alakváltozást és az idő-hőmérséklet-függő viselkedést egységesen kezeli [18].

2.2. Laboratóriumi infrastruktúra

A Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék Műanyag- és Gumi Anyagvizsgáló Laboratóriuma (1. ábra) biztosítja a gumik karakterizálásához szükséges infrastruktúra jelentős részét. A laboratóriumban megtalálható egy Instron 68TM-10 univerzális anyagvizsgáló gép a hozzá illeszthető hőkamrával, nitrogén tárolótartállyal, egy érintésmentes videoextenzométer, egy GOM Aramis optikai nyúlásmérő, valamint egy Shore keménységmérő berendezés is. Rendelkezésre áll továbbá egy ISO 37 szabványnak megfelelő próbatest stancoló berendezés is [22]. A laboratórium úgy került felszerelésre, hogy a gumi anyagok vizsgálata mellett lehetőség legyen műanyagok vizsgálatára is. Ezen laboratórium folyamatos mérési szolgáltatásokat nyújt a régiós termelővállalatoknak.



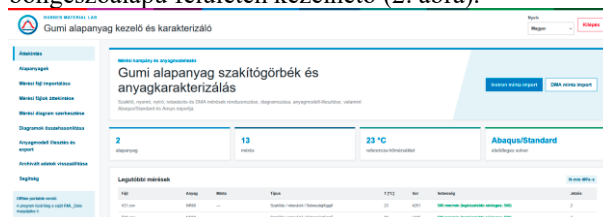
1. ábra. A Debreceni Egyetem Műanyag- és Gumi Anyagvizsgáló Laboratóriuma [21].

Ezen kívül a Debreceni Egyetem Kémia Intézetében elérhető egy Metravib DMA berendezés is, amellyel meghatározható a gumik dinamikai viselkedése is [19-20].

3. RUBBER MATERIAL LAB SZOFTVER FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSE

3.1. Szoftver felépítése

A Rubber Material Lab telepítést nem igénylő, helyben futtatható Windows-alkalmazás, amely böngészőalapú felületen kezelhető (2. ábra).



2. ábra. Rubber Material Lab szoftver kezelőfelülete

A szoftver a háttérben kezeli az importált fájlokat, a projektadatbázist és a számításokat, magyar és angol nyelven, internetkapcsolat nélkül is használható. A projektmappa elkülönítve tárolja a nyers és feldolgozott adatokat, az exportokat, az archívumokat és a biztonsági mentéseket. Minden importált forrásfájl változatlan formában megőrződik, és SHA-256-ellenőrzőösszeget kap. A munkafolyamat az alapanyag definiálásával és a hozzá tartozó mérési adatok importálásával kezdődik. Az adatok feldolgozását és összehasonlítását követően hiperelasztikus anyagmodell illeszthető a kiválasztott mérési görbékre, majd a kapott paraméterek Abaqus- és Ansys-kompatibilis formátumban exportálhatók. Ezen logikai felépítés a 3. ábrán látható.



3. ábra. Rubber Material Lab szoftver felépítése

3.2. Alapanyagok definiálása

Az alapanyagok definiálása menüpontban lehetőség nyílik többféle alapanyag definiálásra, amelyhez lehetőség van hozzárendelni az alapanyag kódját, megnevezését, gyártási tételét és a mérést végző személy nevét. Amennyiben valamelyik alapanyagra nincs szükségünk azt archiválni is lehet, amely egy külön menüpontban visszaállítható a későbbiekben.

3.3. Mérési fájlok importálása

A mérési fájlok importálása során lehetőség van az Instron és a Metravib anyagvizsgáló gépekből exportált .csv fájlok beolvasására. Az Instron berendezésből exportált fájlok esetében az első sor a mért mennyiségek megnevezését, a második sor pedig a hozzájuk tartozó mértékegységeket tartalmazza. A szoftver ezt a struktúrát automatikusan felismeri, és a beolvasott adatokat ennek megfelelően kezeli. A menüben a mérési adathoz hozzá tudjuk rendelni az alapanyagot, a vizsgálat típusát (húzó, nyomó, nyíró, DMA), a mérési módot, a mérés dátumát, a mérést végző személy nevét, a próbatest sorszámát és a vizsgálati hőmérsékletet is. Ezen kívül itt manuálisan is megadható a próbatestünk keresztmetszete, ahol a nyúlást mérjük, illetve a videoextenzométeres méréshez használt pontoknak a távolsága. Ezek általában az Instron gépben is megadásra kerülhetnek, amelyet a szoftver szintén felismer és a későbbiekben összehasonlítható lesz. A mérési sebességet a szoftver automatikusan felismeri.

3.4. Mérési fájlok áttekintése

Ebben a menüpontban lehetőségünk nyílik az importált adatok áttekintésére és azoknak esetleges archiválására. Itt feltüntetésre kerül a beolvasott fájl neve, az alapanyag megnevezése, a mérés dátuma, a mérést végző személy neve, a mérés típusa, a vizsgálati hőmérséklet, a mérési sebesség, valamint az is, hogy a mérési adatunk hány sorból áll.

3.5. Mérési diagram szerkesztése

A mérési diagram szerkesztése fülénél lehetőségünk nyílik a mérési adatokat megtekinteni diagram formájában, ahol lenyíló menü alapján lehetőségünk van kiválasztani, hogy a diagram függőleges és vízszintes tengelyen milyen adatokat kívánunk megjeleníteni. Gumik mérésénél több alkalommal előfordul, hogy a próbatestünk elszakad, ezeket az adatokat itt levághatjuk manuálisan, vagy használhatjuk a szoftver által felismert szakadási értékeket is. Ezen kívül itt közelítő függvényeket (lineáris, polinomok, hatványfüggvények, logaritmikus és exponenciális függvény) is illeszthetünk a görbékre. Az illesztett függvények a diagramon is megjelennek, és az illesztéshez tartozó számszerű paraméterek is megjelenítésre kerülnek. A feldolgozott görbék elmentésre kerülnek, amelyekhez elnevezés is rendelhető.

3.6. Diagramok összehasonlítása

Ezen menüpontban az eredeti és a feldolgozott görbéket is össze lehet hasonlítani egymással, amelyekre szintén közelítő görbék illeszthetők. Itt is kiválasztható, hogy a vízszintes és a függőleges tengelyen milyen értékek kerüljenek megjelenítésre.

3.7. Anyagmodell illesztés és export

Az anyagmodell illesztés és export menüpontban lehetőség nyílik a korábban meghatározott görbéket kiválasztani és azokra anyagmodellt illeszteni. Az illesztőmodul Neo-Hooke-, két- és ötparaméteres Mooney-Rivlin-, Yeoh (egy-három paraméteres)-, Ogden (egy-három paraméteres)- és Arruda-Boyce-modelleket kezel. Ezek a modellek ma is széles körben használatosak, mert más-más kompromisszumot kínálnak az egyszerűség, a rugalmasság és az extrapoláció között [1-7]. A szoftver használata során ki kell választanunk pontosan, hogy melyik anyagmodellre kívánunk illeszteni.

A hyperelasztikus anyagmodellek paramétereinek meghatározása görbénként normalizált, kiegyensúlyozott legkisebb négyzetes célfüggvény minimalizálásával történik, ez megakadályozza, hogy az eltérő mintavételi sűrűségű mérési görbék aránytalanul befolyásolják a végeredményt. A nemlineáris optimumkeresés több kezdőpontból indított, deriváltmentes Nelder-Mead simplex algoritmussal történik, amelyet a kapott

paraméterkészlet fizikai érvényességének ellenőrzése követ.

Az illesztést követően jelentést kapunk az illesztett görbék SSE- (Sum of Squared Errors), RMSE- (Root Mean Square Error), SEE- (Standard Error of the Estimate) és R^2 -mutatóiról, valamint a az egyes görbék illesztési hibáit is meghatározza és megjeleníti. Különböző jeltartományú görbék összevetéséhez szórással korrigált célfüggvények is választhatók.

A program ellenőrzi a kezdeti nyírási modulust, a feszültség- és energiaértékek végességét, a feszültség előjelét és a tangensviselkedést az illesztett tartományban. Ez nem teljes matematikai stabilitási bizonyítás, de kiszűri a nyilvánvalóan hibás paraméterkészleteket.

Az anyagmodell illesztését követően az adott anyagmodellekhez tartozó értékek megjelenítésre kerülnek, amelyeket a végelem szoftver használ. Ezt követően lehetőség nyílik továbbá az Abaqus szoftverben használt .inp fájl kimentésére és az Ansysnál használt APDL formátum exportálására. Ezen fájlokat az említett két szoftverbe könnyen importálhatók és így az adatokat sem szükséges manuálisan beírni.

3.8. Archiválás és segítség menüpont

Az utolsó két menüpontban lehetőségünk van a korábban archivált adatok visszaállítására, illetve a segítség menüpontban megtaláljuk a szoftver készítőjének nevét, illetve az adott verziótörténetet is a szoftverről, hogy az újabb verziókban mi került bevezetésre.

4. JÖVŐBELI TERVEK

A jövőben a szoftvert ki kívánjuk bővíteni GOM Aramis mérési eredmények beolvasásával is, amellyel pontosabban meghatározhatóak a nyúlásértékek és a Poisson-tényező is. További fejlesztési irány az anyagmodell illesztése a viszkoelasztikus viselkedést leíró Prony-sorral, valamint annak bővítése a Mullins- és Payne-hatás paraméterezésével. A végső célunk pedig még az is lenne, hogy az adott anyagkártyákhoz végelelemes szimulációt is készítsünk, amelyet a szoftverrel validálni is tudunk majd.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszéke az elmúlt évtizedben nagy hangsúlyt fektetett a műanyag és gumiipari kutatásokba. Ezt jól igazolja, hogy a tanszéken több kolléga is foglalkozik ilyen jellegű kutatással, amelynek egy jó bázisa a Műanyag- és Gumi Anyagvizsgáló Laboratórium. Ez laboratórium remekül kiszolgálja a tudományos és ipari igényeket is.

A fejlesztett Rubber Material Lab legfontosabb előnye, hogy egységes és reprodukálható munkafolyamatot biztosít a gumianyagok karakterizálása során keletkező nagy mennyiségű mérési adat feldolgozására. A szoftver

támogatja az adatok szerkesztését, összehasonlítását és archiválását, továbbá lehetővé teszi hiperelasztikus anyagmodellek illesztését és az illesztés minőségének számszerű értékelését. Az azonosított anyagmodell-paraméterek Abaqus és Ansys végelelemes környezetben közvetlenül felhasználhatók. A kialakított munkafolyamat csökkenti a manuális adatfeldolgozás igényét, valamint elősegíti a mérési eredmények következetes, reprodukálható kezelését.

6. SUMMARY

The Department of Mechanical Engineering at the Faculty of Engineering, University of Debrecen, has placed considerable emphasis on research into plastic and rubber products over the past decade. This is demonstrated by the fact that several researchers at the department are actively involved in this field, with the Plastics and Rubber Materials Testing Laboratory providing a strong foundation for these activities. The laboratory effectively supports both scientific research and industrial needs.

The main advantage of the developed Rubber Material Lab software is that it provides a standardized and reproducible workflow for processing the large amount of measurement data generated during the characterization of rubber materials. The software supports the editing, comparison, and archiving of measurement data and enables the fitting of hyperelastic material models as well as the quantitative evaluation of fitting quality. The identified material model parameters can be directly used in Abaqus and Ansys finite element environments. The developed workflow reduces the need for manual data processing and facilitates the consistent and reproducible handling of measurement results.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„A Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-KDP-2025 kódszámú Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program – Kooperatív Doktor Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.”



8. IRODALOM

[1] MOONEY, M.: *A Theory of Large Elastic Deformation*, Journal of Applied Physics, 11(9), 582-592, 1940. <https://doi.org/10.1063/1.1712836>

[2] RIVLIN, R. S.: *Large Elastic Deformations of Isotropic Materials*, I. Fundamental Concepts. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 240(822), 459-490, 1948. <https://doi.org/10.1098/rsta.1948.0002>

- [3] OGDEN, R. W.: *Large Deformation Isotropic Elasticity - On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids*, Proceedings of the Royal Society A, 326(1567), 565-584, 1972. <https://doi.org/10.1098/rspa.1972.0026>
- [4] YEOH, O. H.: *Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber*, Rubber Chemistry and Technology, 66(5), 754-771, 1993. <https://doi.org/10.5254/1.3538343>
- [5] ARRUDA, E. M.; BOYCE, M. C.: *A Three-Dimensional Constitutive Model for the Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Materials*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 41(2), 389-412, 1993. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(93\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0022-5096(93)90013-6)
- [6] MARCKMANN, G.; VERRON, E.: *Comparison of Hyperelastic Models for Rubber-Like Materials*, Rubber Chemistry and Technology, 79(5), 835-858, 2006. <https://doi.org/10.5254/1.3547969>
- [7] HE, H.; ZHANG, Q.; ZHANG, Y.; CHEN, J.; ZHANG, L.; Li, F.: *A Comparative Study of 85 Hyperelastic Constitutive Models for Both Unfilled Rubber and Highly Filled Rubber Nanocomposite Material*, Nano Materials Science, 4(2), 64-82, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.07.003>
- [8] BERGSTRÖM, J. S.; BOYCE, M. C.: *Constitutive Modeling of the Large Strain Time-Dependent Behavior of Elastomers*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 46(5), 931-954, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(97\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(97)00075-6)
- [9] WILLIAMS, M. L.; LANDEL, R. F.; FERRY, J. D.: *The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-Forming Liquids*, Journal of the American Chemical Society, 77(14), 3701-3707, 1955. <https://doi.org/10.1021/ja01619a008>
- [10] MULLINS, L.: *Softening of Rubber by Deformation*, Rubber Chemistry and Technology, 42(1), 339-362, 1969. <https://doi.org/10.5254/1.3539210>
- [11] DIANI, J.; FAYOLLE, B.; GILORMINI, P.: *A Review on the Mullins Effect*, European Polymer Journal, 45(3), 601-612, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.11.017>
- [12] PAYNE, A. R.: *The Dynamic Properties of Carbon Black-Loaded Natural Rubber Vulcanizates*, Part I. Journal of Applied Polymer Science, 6(19), 57-63, 1962. <https://doi.org/10.1002/app.1962.070061906>
- [13] MANKOVITS, T.; SZABÓ, T.: *Finite Element Analysis of Rubber Bumper Used in Air-Springs*, Procedia Engineering, 48, 388-395, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.530>
- [14] MANKOVITS, T.; SZABÓ, T.; KOCSIS, I.; PÁCZELT, I.: *Optimization of the Shape of Axis-Symmetric Rubber Bumpers*, Strojníški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 60(1), 61-71, 2014. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2013.1315>
- [15] HURI, D.; Mankovits, T.: *Comparison of the Material Models in Rubber Finite Element Analysis*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 393, 012018, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012018>
- [16] HURI, D.; MANKOVITS, T.: *Automotive Rubber Product Design Using Response Surface Method*, Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 50(1), 28-38, 2022. <https://doi.org/10.3311/PPtr.16280>
- [17] HURI, D.: *Prediction Accuracy of Hyperelastic Material Models for Rubber Bumper under Compressive Load*, Polymers, 16(17), 2534, 2024. <https://doi.org/10.3390/polym16172534>
- [18] FAZEKAS, B.; GODA, T. J.: *Constitutive Modelling of Rubbers: Mullins Effect, Residual Strain, Time-Temperature Dependence*, International Journal of Mechanical Sciences, 210, 106735, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106735>
- [19] ADAMS, J. W.; Merrett, C. G.: *Comparing Different Data Processing Methods for Determining a Prony Series from Dynamic Mechanical Analyzer Frequency Data*, Polymer Engineering & Science, 63(5), 1459-1470, 2023. <https://doi.org/10.1002/pen.26297>
- [20] Waste, P., Jogi, B., Ratna, D., Warhatkar, H., Al-Hamad, A., Dalvi, V., Chakraborty, B., Kulkarni, A.P., Balogh, G.: *Viscoelastic and damping properties of ethylene vinyl acetate (EVA) and its dicumyl peroxide (DCP) cross-linked variants*, Discover Materials, 2026. <https://doi.org/10.1007/s43939-026-00803-3>
- [21] University of Debrecen, Department of Mechanical Engineering: Plastic and Rubber Materials Testing Laboratory. <https://mecheng.unideb.hu/node/311>
- [22] ISO 37:2024; *Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties*, International Organization for Standardization, Geneva.

HELYETTESÍTŐ MODELL ALAPÚ OPTIMALIZÁLÁS TERMELÉSI RENDSZEREK FEJLESZTÉSÉRE

SURROGATE MODEL-BASED OPTIMIZATION FOR THE DEVELOPMENT OF PRODUCTION SYSTEMS

Ruzicska Gábor*, Dr. Czégé Levente**, Dr. Mankovits Tamás***

ABSTRACT

Optimizing production systems using simulation models makes it possible to analyze system performance under various operating conditions; however, running simulation experiments multiple times can require significant computational resources. The goal of this research is to develop and evaluate an approach for optimizing a manufacturing system based on a surrogate model, and then to validate the resulting solution using the original simulation model. The subject of this study is a stochastic production system in which the speeds of the two conveyor belts and the processing time spent at the production station serve as control parameters. The system's efficiency is evaluated based on three indicators: productivity, average congestion time, and equipment downtime. Based on the data obtained from the simulation experiments, we construct surrogate models that approximately describe the relationship between the control parameters and the system's performance metrics. To find the optimal combination of parameters, a genetic algorithm is used that relies on the predictions of the surrogate model at each step of the optimization process, rather than running the simulation model directly. The resulting optimal configuration is subjected to further validation using the original simulation model. Given the stochastic nature of the system under study, validation is performed using multiple independent iterations, which allows for the evaluation of the mean values of the performance metrics and their standard deviations. The results of the research indicate that the use of surrogate models is a promising solution for reducing computation time in the optimization of manufacturing systems, while repeated simulation validation makes it possible to assess the reliability of the resulting optimal solution.

1. BEVEZETÉS

A modern gyártási rendszereket az egyes technológiai folyamatok nagyfokú összetettsége és egymástól való függése jellemzi. A berendezések paramétereinek, a szállítási műveleteknek és a feldolgozási időnek a megváltoztatása jelentősen befolyásolhatja a teljes rendszer teljesítményét. Ezért a leghatékonyabb üzemmód meghatározása fontos feladat a termelési

rendszerek tervezése és fejlesztése során. A gyártási rendszerek vizsgálatának egyik elterjedt módszere a diszkrét eseményalapú szimulációs modellezés. A szimulációs modellek lehetővé teszik a technológiai műveletek sorrendjének, a gyártási erőforrások korlátainak, a munkállomások közötti termékfelhalmozódásnak, valamint például a berendezések meghibásodásával kapcsolatos véletlenszerű események figyelembevételét. Az analitikai modellektől eltérően a szimulációs modellezés lehetővé teszi a bonyolult gyártási folyamatok vizsgálatát anélkül, hogy azok szerkezetét jelentősen le kellene egyszerűsíteni. Ugyanakkor a szimulációs modellek közvetlen alkalmazása az optimalizálási folyamat során jelentős számításiigénnyel járhat, mivel a paraméterek minden egyes kombinációjának értékeléséhez külön szimulációs kísérletet kell elvégezni. Ez a probléma különösen aktuális a sztochasztikus gyártási rendszerek esetében. Ebben az esetben ugyanaz a bemeneti paraméterkészlet véletlenszerű tényezők jelenléte miatt eltérő eredményeket eredményezhet a modell egyes futtatásai során. A teljesítmény megbízható becsléséhez több független ismétlés végrehajtására van szükség, ami tovább növeli az optimalizálási eljárás számítási igényét. Így olyan módszerekre van szükség, amelyek lehetővé teszik a szimulációs modellhez intézett közvetlen lekérdezések számának csökkentését anélkül, hogy a vizsgált rendszer becslésének pontossága jelentősen romlana. Az egyik lehetséges megoldás a helyettesítő modellek alkalmazása. Ez a megközelítés egy számításiigényben alacsony költségű közelítő modell felépítését jelenti, amely a korábban elvégzett szimulációs kísérletek eredményein alapul. A betanítás után a helyettesítő modell felhasználható a gyártási rendszer kimeneti jellemzőinek gyors előrejelzésére a bemeneti paraméterek különböző kombinációi esetén. Ez lehetővé teszi, hogy a számítási terhelés nagy részét a szimulációs modellel a lényegesen gyorsabb előrejelzési szakaszra helyezzük át, és a kapott modellt közvetlenül az optimalizálási eljárásban használjuk fel. A gépi tanulási módszerek különösen érdekesek a helyettesítő modellek felépítéséhez, mivel képesek a bemeneti és kimeneti változók közötti nemlineáris összefüggéseket közelíteni. Különösen a döntési fákra épülő módszerek alkalmazhatók a gyártási rendszerekben felmerülő összetett összefüggések modellezésére. Azonban az

* tanársegéd, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

** egyetemi docens, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

*** egyetemi docens, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

egyes helyettesítő modellek magas pontossága nem garantálja, hogy az azok segítségével megtalált optimális konfiguráció hasonló jellemzőket biztosít majd a kiindulási sztochasztikus szimulációs modell újbéli futtatásakor. Ezért a helyettesítőmodell-alapú optimalizálás fontos eleme a kapott megoldás független ellenőrzése a kiindulási modell segítségével. Jelen tanulmányban egy olyan megközelítést vizsgálunk a sztochasztikus termelési rendszer optimalizálására, amelyben a helyettesítőmodellt használjuk a vezérlőparaméterek optimális kombinációjának megtalálásához, majd a kapott megoldást egy diszkrét eseményalapú szimulációs modell segítségével ellenőrizzük. A vezérlő paraméterekként a két szállítószalag sebességét és a gyártóállomáson eltöltött feldolgozási időt vesszük figyelembe. A rendszer hatékonyságának kritériumai a termelékenység, az átlagos torlódási idő és a berendezés meghibásodási ideje. Az optimális konfiguráció megtalálásához genetikus algoritmust alkalmazunk, amely a helyettesítő modellekből származó, előre jelzett mutatóértékeket használ fel. A kutatás fő célja annak értékelése, hogy alkalmazható-e a helyettesítő-alapú optimalizálás a sztochasztikus gyártási rendszer hatékony működési üzemmódjának meghatározására, valamint a kapott megoldás megbízhatóságának ellenőrzése többszöri, egymástól független szimulációs ismétlések segítségével. Ez a megközelítés nemcsak a jövőbeni gyártási paraméterek ígéretes kombinációjának meghatározását teszi lehetővé, hanem a helyettesítő modell előrejelzései és a kiindulási szimulációs modell tényleges eredményei közötti eltérések számszerű értékelését is. A kizárólag a gépi tanulási modell pontosságának értékelésére irányuló kutatásokkal ellentétben a jelen tanulmányban a fő hangsúlyt a helyettesítő modellnek az optimalizációs folyamat részeként való felhasználására, valamint a megtalált megoldás utólagos statisztikai validációjára helyezzük. Ez lehetővé teszi, hogy a helyettesítő modellt ne csupán előrejelzési eszközként, hanem a termelési rendszer szimulációs-optimalizációs vizsgálatának hatékonyságát növelő eszközként is tekintsük.

2. IRODALOMKUTATÁS

A szimulációs modellezést széles körben alkalmazzák összetett gyártási rendszerek elemzésére és optimalizálására; azonban a számításgépes modellek közvetlen felhasználása az optimalizálási eljárásokban jelentősen megnövelheti a megoldás kereséséhez szükséges időt. Ennek kapcsán a szakirodalomban jelentős figyelmet szentelnek a metamodelleknek és a helyettesítő modelleknek, amelyek közelítőleg leírják a rendszer bemeneti paraméterei és a szimulációs modellezés eredményei közötti összefüggést [1].

Barton és Meckesheimer a metamodellt a szimulációs modellezésen alapuló hatékony optimalizációs eszközként tekintik. A szerzők rámutatnak, hogy a metamodell alkalmazásával a kiindulási modell számos

költséges futtatása helyett lényegesen gyorsabb számítások végezhetők, ami különösen fontos a sztochasztikus diszkrét eseményalapú rendszerek esetében [2].

Hong és Zhang áttekintése a sztochasztikus szimulációs modellek helyettesítő optimalizálásának modern módszereivel foglalkozik. A szerzők különböző típusú helyettesítő modelleket vizsgálnak, és hangsúlyozzák a válaszfelület-aproximáció és az optimumkeresési eljárás hatékony kombinációjának fontosságát [3].

Ezen irányzat szisztematikusabb elemzését a metamodell-alapú szimulációs optimalizálásról szóló tanulmány tartalmazza. A szerzők osztályozzák a meglévő megközelítéseket, és rámutatnak arra, hogy a gépi tanulási módszerek fejlődése további lehetőségeket teremt a komplex szimulációs rendszerek rugalmasabb és pontosabb metamodelljeinek kidolgozásához [4].

Különösen aktuális a metamodellek közvetlen alkalmazása a gyártási rendszerekben. Li és munkatársai kidolgoztak egy metamodellt egy sztochasztikus gyártási rendszerhez, és integrálták azt a Monte Carlo-módszerrel, valamint a gyártástervezés többkritériumos optimalizálásával. Az eredmények azt mutatták, hogy jelentősen felgyorsítható az alternatív gyártási megoldások értékelése [5].

Hasonló irányvonalat mutat be az a tanulmány, amely a gyártási mutatók többcélú optimalizálását vizsgálja egy diszkrét eseményalapú gyártási modell helyettesítőmodellje alapján. A szerzők metamodellt alkalmaztak több gyártási kritérium közelítésére, majd egy kompromisszumos megoldás keresésére. Ez alátámasztja a szurrogátmodellek alkalmazásának célszerűségét, amikor a gyártási rendszer több jellemzőjét is egyszerre kell figyelembe venni [6].

Egy külön irányzat a Random Forest paraméteres helyettesítő modellként való alkalmazásához kapcsolódik. Antoniadis és munkatársai kimutatták, hogy a Random Forest hatékonyan felhasználható metamodellek felépítésére, valamint a bemeneti változók komplex modellek eredményeire gyakorolt hatásának értékelésére. Jelen kutatás szempontjából különösen fontos, hogy a jellemzők fontossági mutatói felhasználhatók a rendszer érzékenységi elemzéséhez [7].

A gépi tanulási módszerek kiválasztásának és beállításának kérdése szintén jelentős szerepet játszik. A helyettesítő modellezési feladatokban különböző gépi tanulási algoritmusokat összehasonlító kutatások azt mutatják, hogy a modellek hatékonysága a paraméterter szerkezetétől és a kiindulási adatok jellemzőitől függ. Ezért egy adott algoritmus kiválasztásakor figyelembe kell venni a vizsgált gyártási rendszer sajátosságait és a rendelkezésre álló adathalmazt.

Korábbi kutatásokban a metamodellezést már közvetlenül a gyártási rendszerek tervezéséhez is alkalmazták. Például a neurális hálózatok és a sztochasztikus lokális keresés együttes használata lehetővé tette a gyártási rendszer optimalizálását anélkül,

hogy folyamatosan vissza kellett volna térni a kiindulási szimulációs modellhez [8].

Így a szakirodalom elemzése azt mutatja, hogy a helyettesítő modellezés ígéretes eszköz a komplex gyártási rendszerek optimalizálásának felgyorsításához. Ugyanakkor a kutatások többsége vagy a pontos metamodellek felépítésére, vagy az optimalizálási algoritmusok kidolgozására összpontosít. Jelen tanulmányban a közvetlen integrációjukra helyezzük a hangsúlyt: a Random Forest modellt gyors helyettesítőként használjuk a genetikusan belüli szimulációs modell helyett, majd a megtalált optimális megoldást független futtatásokkal az eredeti sztochasztikus modell segítségével további ellenőrzésnek vetjük alá. Ez a megközelítés lehetővé teszi az optimalizációs keresés hatékonyságának és a megtalált megoldás gyakorlati alkalmazásának egyidejű értékelését.

3. MÓDSZERTAN

Jelen tanulmányban egy gyártási rendszer optimalizálására szolgáló módszertant javasolunk, amely a diszkrét eseményalapú szimulációs modellezés, a helyettesítő modell és az optimalizációs algoritmus együttes alkalmazásán alapul.

Először egy szimulációs modell segítségével létrehozunk egy adatsort, amely a gyártási rendszer működésének eredményeit tartalmazza a vezérlő paraméterek különböző kombinációi esetén. A kapott adatok alapján betanítjuk a helyettesítő modelleket, amelyek lehetővé teszik a főbb teljesítménymutatók értékelését anélkül, hogy közvetlenül elindítanánk az eredeti szimulációs modellt. A helyettesítő modellek pontosságának értékelését követően azokat számítógépes értékelési függvényként használják az optimalizációs algoritmuson belül. A megtalált optimális konfigurációt ezután visszajuttatják az eredeti szimulációs modellbe, és több független ismétlés segítségével ellenőrzik.

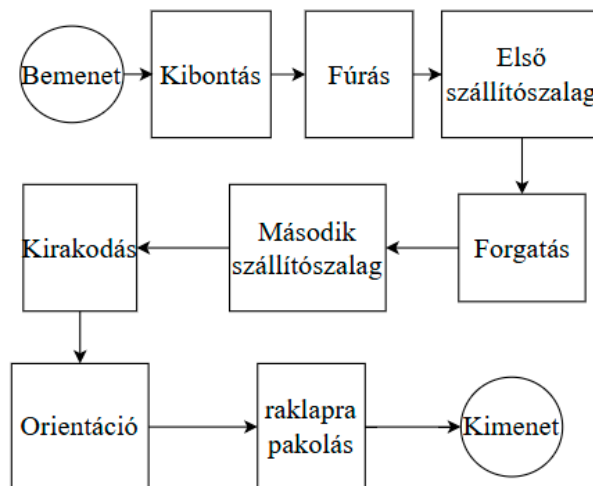
A javasolt megközelítés a következő fő lépésekből áll:

1. adatbázis létrehozása szimulációs modell alkalmazásával;
2. az adatok előfeldolgozása és előkészítése;
3. helyettesítő modellek felépítése és értékelése;
4. az optimalizálási célfüggvény meghatározása;
5. a vezérlő paraméterek optimális kombinációjának keresése;
6. a kapott megoldás független validálása a kiindulási szimulációs modell felhasználásával.

Ez a felosztás lehetővé teszi, hogy az közelítő modell felépítésének szakaszát elkülönítsük az optimalizálás és a talált megoldás utólagos ellenőrzésének szakaszától.

3.1. Szimulációs modell és vezérlő paraméterek

A kutatás tárgyát a Siemens Tecnomatix Plant Simulation szoftverkörnyezetben megvalósított gyártási rendszer képezi. A modell a gyártási folyamat diszkrét eseményalapú modellje, amely magában foglalja a termékek szállítását a technológiai műveletek között, valamint a termékek feldolgozását a gyártóállomáson. Az 1. ábra szemlélteti a modell sematikus ábráját.



1. ábra A gyártási rendszer sematikus ábrája

Három változót veszünk figyelembe vezérlő paraméterként:

$$\theta = [v_1, v_2, p_i] \quad (1)$$

ahol v_1 és v_2 a két szállítószalag sebessége, illetve p_i az állomás feldolgozási ideje.

A szimulációs modell minden paraméterkombinációra kiszámítja a rendszer teljesítményét jellemző kimeneti mutatók értékeit. Jelen tanulmányban három fő mutatót használunk:

- Kapacitás (T) - a rendszer által a vizsgált időszak alatt előállított termékek száma;
- Átlagos torlódási idő (C) - a rendszer vizsgált elemeiben fellépő torlódások átlagos időtartama;
- Meghibásodási idő (F) - a berendezések meghibásodásainak időtartama.

Így a vezérlő paraméterek és a termelési rendszer jellemzői közötti összefüggés általános formában a következőképpen ábrázolható:

$$Y(\theta, \zeta) = [T(\theta, \zeta), C(\theta, \zeta), F(\theta, \zeta)] \quad (2)$$

ahol ζ a szimulációs modellben jelen lévő véletlenszerű tényezőket jelöli, melyek jelenléte teszi a feladatot sztochasztikussá, azaz azonos vezérlőparaméterek mellett a modell egyes futtatásai eltérhetnek.

3.2. Adatok előkészítése a helyettesítő modellhez

A helyettesítő modell felépítéséhez a szimulációs kísérletek eredményeként kapott adatsort használjuk fel. Az adatsor minden egyes sora egy bemeneti paraméterkombinációnak és a hozzá tartozó szimulációs modell futtatásának eredményeinek felel meg. A létrehozott adatkészlet 40000 megfigyelést tartalmaz. A vizsgált paramétertartomány

$$\begin{aligned} 0.01 \leq v_1 \leq 0.3 \\ 0.01 \leq v_2 \leq 0.3 \\ 20 \leq p_t \leq 60 \end{aligned} \quad (3)$$

3.3. A helyettesítő modell felépítése

A vezérlő paraméterek és a teljesítménymutatók közötti összefüggések közelítéséhez a véletlenszerű erdő (Random Forest) módszert alkalmazzuk. A három kimeneti mutató mindegyikéhez külön regressziós modellt építünk:

$$\begin{aligned} \hat{T} &= f_T(v_1, v_2, p_t) \\ \hat{C} &= f_C(v_1, v_2, p_t) \\ \hat{F} &= f_F(v_1, v_2, p_t) \end{aligned} \quad (4)$$

ahol $\hat{T}$, $\hat{C}$ és $\hat{F}$ a helyettesítő modell előrejelzései.

A kiindulási adathalmazt tanulási és tesztelési részre osztjuk. Az tanulási mintát a modellek felépítéséhez használjuk, míg a tesztelési mintát a modellek prediktív képességének független értékelésére alkalmazzuk. Értékelési kritériumként a négyzetes középértékű hiba (RMSE), az átlagos abszolút hiba (MAE) és a determinációs együttható R^2 szolgálnak.

1. táblázat A modell adatai

	Kapacitás	Átlagos torlódási idő	Meghibásodási idő
RMSE	2.649	1.705	125.001
MAE	1.829	1.318	95.385
R^2	0.985	0.975	0.921

A helyettesítő modell további alkalmazásának fontos feltétele az optimalizálás során az, hogy a modell képes legyen kellő pontossággal leképezni a bemeneti és kimeneti paraméterek közötti összefüggést. Ezért a modellek értékelésének szakaszát az optimalizálási eljárás megkezdése előtt hajtjuk végre.

3.4 A célfüggvény definiálása

Mivel egyszerre kell növelni a termelékenységet, és csökkenteni a torlódások és a meghibásodások előfordulási idejét, a feladat természeténél fogva többkritériumosnak tekinthető. Az egykritériumos

optimalizációs algoritmus alkalmazásához a három mutatót egyetlen normalizált célfüggvénybe egyesítjük.

A normalizált mutatók a rendszer alapüzemmódjához viszonyítva határozhatók meg:

$$\begin{aligned} T_n &= \frac{\hat{T}}{T_0} \\ C_n &= \frac{\hat{C}}{C_0} \\ F_n &= \frac{\hat{F}}{F_0} \end{aligned} \quad (5)$$

ahol T_0 , C_0 és F_0 a rendszer alapkonfigurációjában szereplő mutatóértékek.

A célfüggvény a következő formájú:

$$J(\theta) = w_T(1 - T_n) + w_F F_n + w_C C_n \quad (6)$$

ahol $w_T=1$, $w_C=0.5$ és $w_F=0.3$ a célfüggvényben alkalmazott súlyértékek.

Ebben a megfogalmazásban a T növelése az első tag csökkenéséhez vezet, míg az F vagy a C növelése a célfüggvény értékét növeli. Ezért az optimalizálási feladat a következőképpen fogalmazható meg [6]:

$$\theta^* = \arg \min J(\theta) \quad (7)$$

3.5 Helyettesítő modell-alapú optimalizálás

Az optimális paraméterkombináció megtalálásához genetikus algoritmust alkalmazunk. A szimulációs modellen alapuló közvetlen optimalizálástól eltérően az algoritmus minden iteráció során egy számításigényesebb helyettesítő modellt vesz igénybe.

Minden lehetséges kombináció esetében a

$$\theta_i = [v_{1,i}, v_{2,i}, p_{t,i}] \quad (8)$$

helyettesítő modellek kiszámítják a következő előrejelzett értékeket. Ezen értékek alapján meghatározhatók a $J(\theta_i)$ értékek. A genetikus algoritmus a kapott célfüggvény-értéket használja fel új jelölt megoldások kiválasztására és kialakítására.

3.6 Az optimális megoldás szimulációs validációja

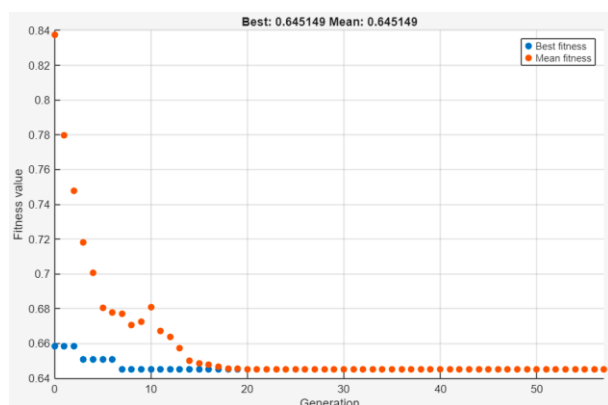
A folyamat során kapott eredményt nem tekintjük automatikusan végleges optimális megoldásnak, mivel a helyettesítő modell csak közelíti az eredeti rendszert.

Ezért az optimalizálási eredmény validálása az eredeti Plant Simulation modellen történik. Az optimális paraméterkombináció mellett r egymástól független

szimulációs replikációt végzünk. A validáció során a surrogate modell által előre jelzett értékeket összehasonlítjuk az eredeti szimulációs modell több független futtatásából származó átlagos értékekkel. Emellett meghatározható a relatív eltérés.

4. EREDMÉNYEK

Az optimalizálást genetikus algoritmus segítségével hajtottuk végre. Az optimalizálás során a célfüggvény értékének gyors csökkenése volt megfigyelhető. Már az első generációban a legjobb érték 0,6586 volt, a hetedik generációra pedig 0,6451-re csökkent. Ezt követően a célfüggvény értékének további javulása gyakorlatilag nem volt megfigyelhető.



2. ábra A célfüggvény konvergenciája az optimalizálás során

A kapott optimális megoldást a következő vezérlőparaméter-értékek jellemzik:

2. táblázat Az optimalizálás eredménye

Paraméter	Optimális Érték
1.szállítószalag sebessége	0.0118 [m/s]
2.szállítószalag sebessége	0.1788 [m/s]
Fordító állomás feldolgozási ideje	40.3213 [s]

A helyettesítő modellek előrejelzései szerint a megadott paraméterek mellett a termelési rendszer várható jellemzői a következők:

3. táblázat Az optimális értékek előrejelzései

Mutató	Előrejelzett érték
Kapacitás	211.47 [db]
Átlagos torlódási idő	104.67 [s]
Meghibásodási idő	810.58 [s]

Így a helyettesítő modelleken alapuló genetikus algoritmus meghatározta azt a paramétertartományt,

amelyben kompromisszum jön létre a rendszer teljesítménye, a termékek felhalmozódásának mértéke és a berendezés megbízhatósága között.

Különös figyelmet érdemel az optimalizációs folyamat konvergenciájának jellege. A célfüggvény értéke az első generációban mért 0,6586-ról a hetedik generációban 0,6451-re csökkent, majd az algoritmus befejezéséig gyakorlatilag változatlan maradt. Ez arra utal, hogy a felépített helyettesítő modell keretein belül a talált megoldás stabil a genetikus algoritmus további keresése tekintetében.

4.1 Az optimális megoldás validációja

Mivel az optimalizálás nem közvetlenül a szimulációs modellen, hanem annak helyettesítő modelljén történt, a kapott megoldást a termelési rendszer eredeti modelljének felhasználásával további ellenőrzésnek kell alávetni.

Ehhez a megtalált paraméterkészlet:

- $v_1=0.0118$ [m/s]
- $v_2=0.1788$ [m/s]
- $p_t=40.3213$ [s]

közvetlenül a Plant Simulation szimulációs modellbe került átvitelre. A gyártási folyamat sztochasztikus jellegét figyelembe véve az értékelést a modell több független futtatásával végeztük el.

A kapott eredményeket összehasonlítottuk a helyettesítő modell előrejelzéseivel. Ez az összehasonlítás lehetővé teszi nemcsak a Random Forest-modellek minőségének értékelését, hanem a helyettesítő megközelítés gyakorlati alkalmasságának felmérését is az ipari rendszer optimális paramétereinek meghatározása szempontjából.

4.2 A becült és a tényleges eredmények összehasonlítása

A helyettesítő modell segítségével kapott döntés megbízhatóságának értékelése érdekében a megtalált optimális paramétereket az eredeti szimulációs modell segítségével is ellenőriztük. Mivel a gyártási rendszer sztochasztikus, az értékelést több független szimulációs futtatás alapján végeztük el. A 4. táblázatban összehasonlítjuk a Random Forest modell által előre jelzett értékeket a szimulációs modellezés átlagos eredményeivel.

4. táblázat A validáció eredménye

Mutató	Előrejelzett érték	Szimulációk átlag-eredményei	Eltérés
Kapacitás	211.47 [db]	224.6 [db]	6.21 [%]
Átlagos torlódási idő	104.67 [s]	100.9 [s]	3.6 [%]
Meghibásodási idő	810.58 [s]	1152.18 [s]	42.14 [%]

Az eredmények azt mutatják, hogy a helyettesítő modell elég pontosan visszaadja a termelési rendszer főbb jellemzőit. A legkisebb eltérés az átlagos torlódási idő esetében figyelhető meg, amely 3,6 %-ot tesz ki, míg a termelékenység eltérése 6,21 %. Ez arra utal, hogy a Random Forest modell elfogadható pontossággal képes becsülni a rendszer termelékenységét és a termékek felhalmozódásának szintjét a megtalált optimális tartományban. A legnagyobb eltérés a berendezés meghibásodási ideje esetében figyelhető meg, ami 42,14 %-os érték. Ez az eltérés összefüggésben van a mutató nagyobb sztochasztikus változékonyságával és azzal, hogy az kevésbé reprezentatív a tanulási mintában. A teljesítménnyel és az átlagos torlódási idővel ellentétben a meghibásodási időt jelentősen nagyobb szórás jellemzi, ezért előrejelzése a helyettesítő modell számára bonyolultabb feladat.

4.3 Az eredmények megvitatása

A kapott eredmények azt mutatják, hogy a helyettesítő optimalizálás lehetővé teszi a számításigényes modellezési szakasz elválasztását a közvetlen optimalizációs kereséstől. A Random Forest modellek betanítása után az optimális paraméterkészlet keresése kizárólag a helyettesítő modellek gyors előrejelzései alapján történik.

Ennek során a validációs eredmények alapvető jelentőségűek. Még akkor is, ha a helyettesítő modellek tesztelése során magas R^2 determinációs együttható-értékeket kapunk, az optimalizálás minőségét nem csupán az egyes előrejelzések pontossága határozza meg, hanem az is, hogy a modell képes-e helyesen leképezni az optimális megoldások tartományát.

Így a javasolt megközelítést nem csupán a szimulációs modellezés eredményeinek közelítő becslésére szolgáló módszerként kell tekinteni, hanem a termelési rendszer paramétereinek felkutatására szolgáló eszközként is, amelynek során a talált megoldást kötelezően ellenőrizni kell a kiindulási szimulációs modellen.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk a sztochasztikus gyártási rendszer optimalizálására alkalmazott szimulációs modellezést tárgyalja. A szimulációs modellezés eredményei alapján Random Forest modelleket hoztunk létre, amelyek lehetővé teszik a termelékenység, a késztermék-készletek szintje és a berendezések meghibásodásáig eltelt idő előrejelzését. Az optimális paraméterek meghatározásához normalizált célfüggvénnyel rendelkező genetikust algoritmust alkalmaztunk. A kapott megoldást a kiindulási szimulációs modell többszöri futtatásával további ellenőrzésnek vetettük alá. A becsült termelékenység 211,47 darab volt, míg a szimulációk eredményei alapján számított átlagérték 224,6 darabot ért el, ami 6,21 %-os eltérést jelent. Az átlagos felhalmozódási időre 104,67, illetve 100,9 másodperces értékeket kaptunk, 3,6 %-os eltéréssel. A legnagyobb

eltérés a meghibásodási idő esetében volt megfigyelhető: az előrejelzés szerint 810,58 másodperc, a szimuláció eredményei szerint pedig 1152,18 másodperc, ami 42,14 %-os eltérésnek felel meg. A kapott eredmények rámutatnak arra, hogy a helyettesítő modell alkalmazása ígéretes megoldás a gyártási rendszerek optimalizálásának felgyorsítására, ugyanakkor megerősítik azt is, hogy az optimális megoldást az eredeti sztochasztikus szimulációs modellen is ellenőrizni kell. A jövőbeli kutatások során a kidolgozott helyettesítő megközelítés továbbfejlesztését tervezzük alternatív gépi tanulási módszerek alkalmazásával, valamint azok pontosságának összehasonlításával a szimulációs modellezés eredményeinek közelítése során.

6. SUMMARY

This article discusses simulation modeling applied to the optimization of a stochastic production system. Based on the results of the simulation modeling, we developed Random Forest models that enable the forecasting of productivity, finished goods inventory levels, and the failure time. To determine the optimal parameters, we used a genetic algorithm with a normalized objective function. The resulting solution was further verified by running the initial simulation model multiple times. The estimated productivity was 211.47 units, while the average value calculated based on the simulation results was 224.6 units, representing a 6.21% difference. We obtained average congestion time of 104.67 and 100.9 seconds, respectively, with a difference of 3.6%. The largest discrepancy was observed in the failure time: 810.58 seconds according to the forecast, and 1,152.18 seconds according to the simulation results, which corresponds to a 42.14% discrepancy. The results obtained indicate that the use of the surrogate model is a promising approach for accelerating the optimization of manufacturing systems, while also confirming that the optimal solution must be verified using the original stochastic simulation model. In future research, we plan to further develop the proposed surrogate approach by applying alternative machine learning methods and comparing their accuracy in approximating the results of simulation modeling.

7. IRODALOM

- [1] MADU C. N.: Simulation in manufacturing: A regression metamodel approach, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 18, No. 3, 1990, pp. 381–389. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(90\)90060-Y](https://doi.org/10.1016/0360-8352(90)90060-Y)
- [2] BARTON R. R., MECKESHEIMER M.: Metamodel-Based Simulation Optimization, in *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 13, 2006, pp. 535–574. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)13018-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)13018-2)

- [3] HONG L. J., ZHANG X.: Surrogate-Based Simulation Optimization, in *Emerging Optimization Methods and Modeling Techniques with Applications*, INFORMS, 2021, pp. 287–311.
<https://doi.org/10.1287/educ.2021.0225>
- [4] SOARES DO AMARAL J. V., MONTEVECHI J. A. B., MIRANDA R. C., JUNIOR W.: Metamodel-based simulation optimization: A systematic literature review, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 114, 2022, 102403.
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102403>
- [5] LI M., YANG F., UZSOY R., XU J.: A metamodel-based Monte Carlo simulation approach for responsive production planning of manufacturing systems, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 38, 2016, pp. 114–133.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.11.004>
- [6] ČERVENÁNSKÁ Z., KOTIANOVÁ J., VAŽAN P., JUHÁSOVÁ B., JUHÁS M.: Multi-Objective Optimization of Production Objectives Based on Surrogate Model, *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 21, 2020, 7870.
<https://doi.org/10.3390/app10217870>
- [7] ANTONIADIS A., LAMBERT-LACROIX S., POGGI J.-M.: Random Forests for Global Sensitivity Analysis: A Selective Review, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 206, 2021, 107312.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107312>
- [8] CHEN M.-C., YANG T.: Design of manufacturing systems by a hybrid approach with neural network metamodeling and stochastic local search, *International Journal of Production Research*, Vol. 40, No. 1, 2002, pp. 71–92.
<https://doi.org/10.1080/00207540110073055>

MODELLEZÉSI MÓDSZEREK A GÉPÉSZETBEN

MODELING METHODS IN MECHANICAL ENGINEERING

Nemes Dániel*

ABSTRACT

Modeling of mechanical systems plays a fundamental role in modern engineering design processes, especially for complex, dynamic systems. This work examines different modeling approaches through different application examples, highlighting their applicability and limitations. The research presents the use of AVL Cruise, Matlab Simulink and Simscape environments, and TPToolbox, with a special focus on polytope-based model transformation methods. The results show that appropriately chosen modeling and control tools significantly contribute to more efficient design and optimization of systems.

A gépészeti rendszerek modellezése alapvető szerepet játszik a korszerű mérnöki tervezési folyamatokban, különösen a komplex, dinamikus rendszerek esetében. Jelen munka különböző modellezési megközelítéseket vizsgál eltérő alkalmazási példákon keresztül, kiemelve azok alkalmazhatóságát és korlátait. A kutatás bemutatja az AVL Cruise, a Matlab Simulink és Simscape környezetek, valamint a TPToolbox használatát, különös tekintettel a politóp alapú modelltranszformációs módszerekre. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a megfelelően megválasztott modellezési és szabályozási eszközök jelentősen hozzájárulnak a rendszerek hatékonyabb tervezéséhez és optimalizálásához.

1. BEVEZETÉS

A mérnöki tervezés egyik alapvető kihívása a vizsgált rendszerek viselkedésének pontos és egyben hatékony leírása. A gépészeti rendszerek esetében ez különösen fontos, mivel a dinamikai, energetikai és szerkezeti sajátosságok együttesen határozzák meg a működést. A modellezés lehetőséget biztosít arra, hogy a fejlesztési folyamat korai szakaszában vizsgáljuk a különböző tervezési alternatívákat, ezáltal csökkentve a fizikai prototípusok számát és a fejlesztési költségeket.

A különböző alkalmazások – például járművek vagy kézi elektromos szerszámok – eltérő modellezési igényeket támasztanak, így szükségessé válik többféle módszer és eszköz párhuzamos alkalmazása. A modern szimulációs környezetek, mint a Matlab Simulink és Simscape, valamint az ipari alkalmazásokban elterjedt AVL Cruise, lehetőséget nyújtanak komplex rendszerek többfizikai modellezésére. Emellett egyre nagyobb

szerepet kapnak a fejlett szabályozástechnikai módszerek, különösen a politóp alapú megközelítések, amelyek hatékony keretet biztosítanak nemlineáris rendszerek kezelésére.

Jelen cikk célja, hogy különböző modellezési technikákon és esettanulmányokon keresztül bemutassa ezen módszerek gyakorlati alkalmazhatóságát, valamint iránymutatást adjon a megfelelő modellezési és szabályozási stratégiák kiválasztásához.

2. MODELLEZÉSI ELJÁRÁSOK BEMUTATÁSA

A gépészeti rendszerek modellezése során több eltérő szemléletű megközelítés alkalmazható, amelyek különböző kompromisszumokat kínálnak a pontosság, a számítási igény és az általánosíthatóság tekintetében. Az alábbiakban a legfontosabb modellezési eljárások kerülnek áttekintésre.

2.1. Analitikus modellezés

Az analitikus (egyenlet alapú) modellezés a fizikai törvényeken alapuló leírásra épül, ahol a rendszer viselkedését differenciálegyenletek, algebrai összefüggések és megmaradási törvények írják le. Tipikus példái a mechanikai rendszerek mozgásegyenletei, energetikai mérlegek vagy villamos hálózatok leírásai. Előnye, hogy a modellek jól értelmezhetők és paramétereik közvetlen fizikai jelentéssel bírnak. Hátránya ugyanakkor, hogy komplex rendszerek esetén a modellalkotás időigényes lehet és gyakran egyszerűsítéseket igényel, amelyek a pontosság rovására mehetnek. Jól szemlélteti ezt Pacejka munkássága [1], mely a kerékabroncsok dinamikájának, azok súrlódási viszonyainak és annak a járműdinamikára gyakorolt hatását részletesen tárgyalta.

2.2. Adatalapú modellezés

Az adatalapú (data-driven) modellezés a rendszer bemeneti-kimeneti méréseire támaszkodik és lookup-table, statisztikai vagy gépi tanulási módszerekkel állít elő modellt. Ide tartoznak például a regressziós modellek, neurális hálók vagy egyéb fekete-doboz jellegű megközelítések. Előnye, hogy nem szükséges részletes fizikai ismeret a rendszerről, valamint jól alkalmazható bonyolult vagy nehezen modellezhető folyamatok

* tanársegéd, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék

esetén. Az adatalapú modellek jó alapot biztosítanak későbbi helyettesítő modellek alkalmazására. Ezek a helyettesítő modellek jöhetnek egy gépi tanulásból vagy modellidentifikációból, amellyel direkt módon modellegyszerűsítést tudunk elvégezni, mégis megőrizve az egyenlet alapú felírás előnyeit. Ugyanakkor korlátozza a megfelelő mennyiségű és minőségű adat szükségessége, valamint az, hogy a modellek általában korlátozottan interpretálhatók és extrapolációs képességük gyenge lehet. Számos további részletet tár fel Lennart könyve a témában [2].

2.3. Vegyes (hibrid) modellezés

A vegyes modellezési megközelítések az analitikus és adatalapú módszerek kombinációját jelentik. Ilyen esetben a fizikai alapú modell struktúráját kiegészítik adatalapú komponensekkel, például paraméterazonosítással vagy nem modellezett dinamikák becslésével. Ez lehetővé teszi a fizikai értelmezhetőség megőrzését, miközben javul a modell pontossága. A hibrid modellek különösen hasznosak olyan rendszereknél, ahol a fizikai modell ismert, de nem teljes, vagy ahol bizonyos nemlineáris hatások nehezen írhatók le analitikusan. Ezt a módszert főként közepes komplexitású rendszerek leírására szokták használni.

2.4. Politopikus modellezés

A politopikus modellezés a nemlineáris rendszerek egy speciális reprezentációját adja, ahol a rendszer egy paraméterfüggő lineáris modellek konvex kombinációjaként írható le. Ez a megközelítés szorosan kapcsolódik a lineáris paraméter-változós (LPV) rendszerekhez és lehetőséget biztosít fejlett szabályozási módszerek alkalmazására [3]. A járművek szabályozásának és átfogó értelmezésének alpművében [4] további részletek olvashatóak. A politóp alapú modellek egyik jelentős előnye, hogy a nemlineáris viselkedést több lineáris modell segítségével közelítik, így alkalmazható a lineáris rendszerekre kidolgozott gazdag módszertan. Ugyanakkor a megfelelő politóp-reprezentáció meghatározása nem triviális feladat, és a modell komplexitása gyorsan növekedhet a paraméterek számának emelkedésével. Fontos megjegyezni, hogy a politopikus modellezés fő alkalmazása a nemlineáris robosztus szabályozótervezésben van, és a hozzá kapcsolódó optimalizációs feladatok is ehhez kapcsolódnak, nem pedig a rendszer dinamikáját leíró együtthatók optimalizálásához.

A politopikus modellezés és a cikkben bemutatott esettanulmányok megértéséhez az alábbi alapfogalmak definiálása szükséges [5]:

TP modell transzformáció: Olyan tenzorszorzat-alapú numerikus eljárás (HOSVD alkalmazásával), amely egy adott nemlineáris (LPV) modellt lineáris időinvariáns (LTI) rendszerek konvex kombinációjára bont fel.

Vertex (csúcspont): A generált politóp csúcspontja, amely a paraméterter egy-egy lokális, lineáris LTI rendszerét (modelljét) reprezentálja.

Súlyfüggvény: Az adott munkapontban meghatározza, hogy a rendszer pillanatnyi viselkedéséhez az egyes vertexek (LTI modellek) milyen arányban (súllyal) járulnak hozzá.

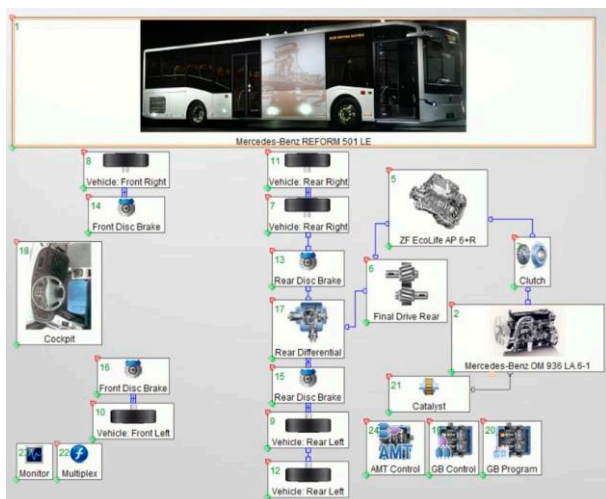
Politóp burok és méret: A vertexek által kifeszített konvex burok, amely befoglalja a rendszermátrix lehetséges paraméter-trajektóriáit. A burok mérete (pl. befoglaló hipertér fogat formájában) befolyásolja az LMI alapú szabályozótervezés konzervativizmusát.

CNO, SNNN, IRNO: A TP transzformáció során alkalmazható különböző normalizációs stratégiák (Close to Normal, Sum Normalisation – Non Negativeness, Inverse Relaxed Normalised), amelyek eltérő méretű és alakú politóp burkokat eredményeznek, ezáltal közvetlenül hatva a belőlük tervezhető szabályozó tulajdonságaira.

3. ESETTANULMÁNYOK

3.1. Mercedes-Benz REFORM 501 LE városi busz szimulációja AVL Cruise szoftver használatával

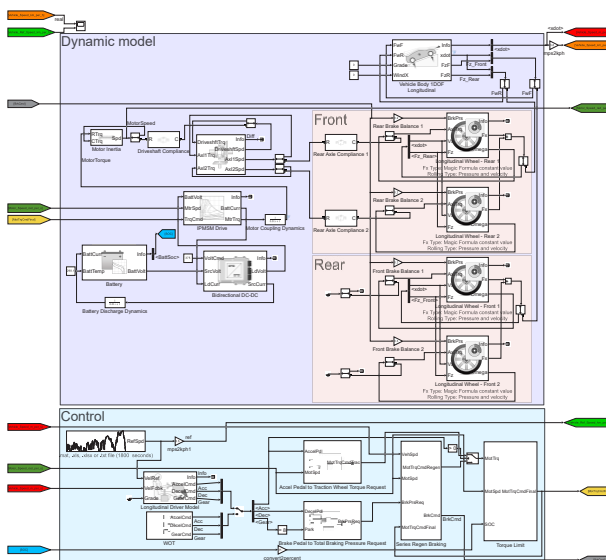
Ebben a kutatásban [6] egy Mercedes-Benz REFORM 501 LE longitudinális járműdinamikai modelljét készítettük el az AVL Cruise szoftver segítségével. Az AVL Cruise szoftver tapasztalataink szerint kiválóan alkalmazható autógyártók kutatólaboratóriumaiiban, illetve olyan kutatóintézményekben, ahol a főként adatalapú modellezési megközelítéshez mérésekkel előállítható a szükséges mennyiségű és minőségű adat. Ebben a kutatásban a szoftverbe beépített példa járműmodell paramétereit hangoltuk át úgy, hogy az leginkább megközelítse a modellezett jármű tulajdonságait. Megállapítható volt, hogy mélyreható mérések nélkül egy ilyen megközelítés nem képes kellő részletességű modellel szolgálni önvezetés vagy menetstabilizálás kutatásához, fejlesztéséhez, azonban hibridizációs lehetőségek későbbi vizsgálatára remekül alkalmazható. A módszer segítségével egy jól felépített modellstruktúra annak fő paramétereinek illesztésével megvizsgálható, hogy például milyen méretű akkumulátort célszerű alkalmazni, hogy a jármű WLTP-szerinti fogyasztása minimális legyen. Az alkalmazott dinamikai modell az 1. ábrán látható.



1.ábra Mercedes-Benz REFORM 501 LE városi busz dinamikai modellje

3.2. Matlab Simulink és Matlab Simscape összehasonlítása járműdinamikai szimulációkban

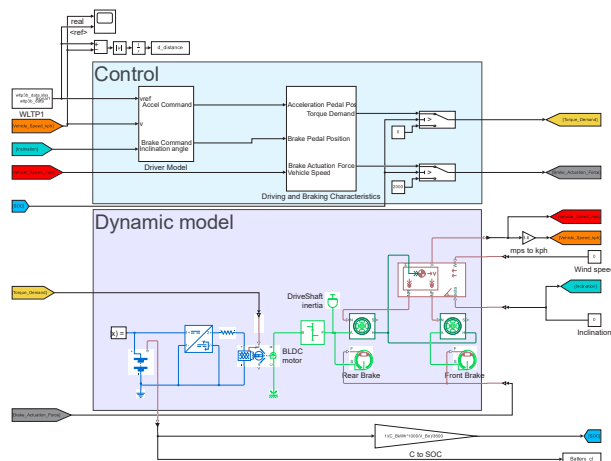
Ebben a kutatásban elkészítettük egy általános jármű dinamikai szimulációját Matlab Simulink és Matlab Simscape segítségével is, majd összehasonlítottuk a modellépítést és a szimulációs eredményeket. A modellek paraméterei a [7] publikációban vannak részletezve. A Simulink modell felépítése a 2. ábrán, míg a Simscape modell felépítése a 3. ábrán látható. A modellek felépítését követően a paraméterek illesztése következett. A folyamat ellenőrzésére a referencia menetciklus lekövetésének pontosságát használtuk. A 4. ábra a Simulink, míg az 5. ábra a Simscape modell referenciakövetését ábrázolja.



2.ábra Matlab Simulink modell felépítése

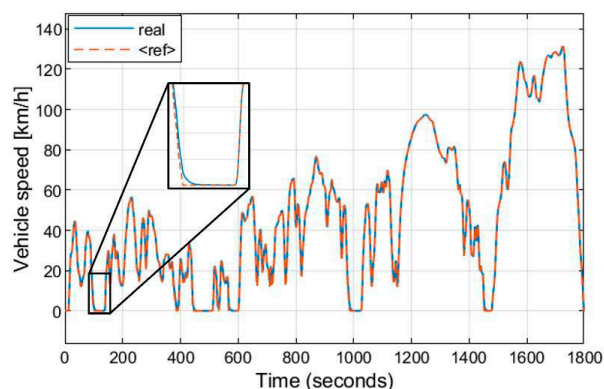
A Simulink járműdinamikai alkalmazásakor javasolt a Powertrain Blockset használata, mellyel lehetőségünk van a Simulinket nem pusztán blokkdiagramos

megközelítésben használni, hanem komplett fizikai alrendszereket egyetlen blokkként beilleszteni. Ilyen összetett blokk a kerék, a motor és a vezérlés is.

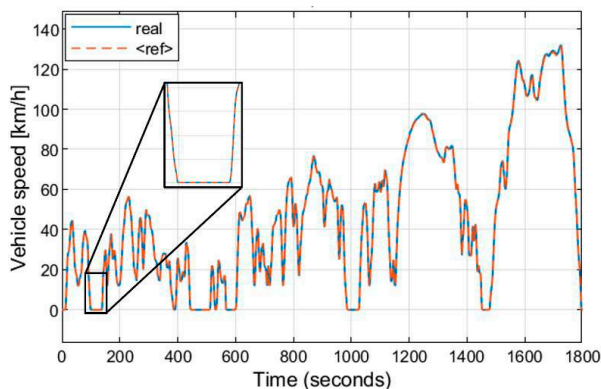


3.ábra Matlab Simscape modell felépítése

A Simscape modellezésnél még inkább felhasználóközelí megoldást lehet alkalmazni. Ennél ugyanis a blokkoknak egyfelől valós fizikai reprezentációja van, másfelől a fizikai kapcsolatokat is egy-egy tartomány-specifikus ággal kell összekötnünk. Ebben a reprezentációban úgy kapcsolódnak össze a blokkok, mint az általuk modellezett fizikai alrendszerek a valóságban. Mivel a modellépítés úgy kívánta, minimális topológiai különbségek vannak a modellek között, mely hatására jól megfigyelhető, hogy míg a Simulink modell a 0 km/h sebességet egy természetes simasággal éri el, addig a Simscape modell hirtelen. A tranziens folyamatok leírásakor nagy szerepet kap a modell részlemeinek pontos topológiája. Ezek a hatások energetikai szimulációknál szintén elhanyagolhatóak, azonban ABS rendszerek tesztelésénél már komoly eltéréseket okozhatnak, ugyanis az ABS rendszer működése épp ezen tranziens átmenetek során lép fel.



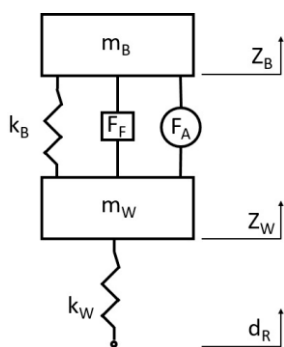
4.ábra Matlab Simulink modell referenciakövetése



5. ábra Matlab Simscape modell referenciakövetése

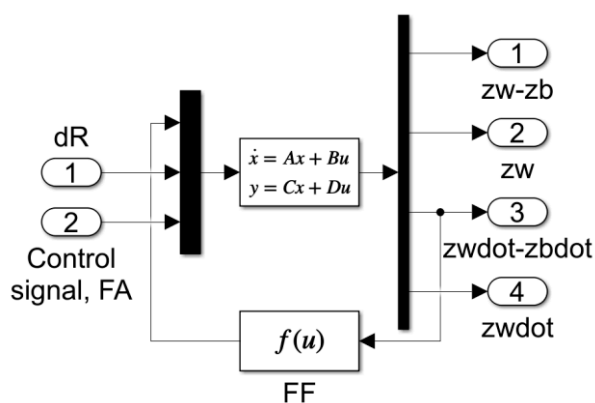
3.3. Járműfelfüggesztés szabályozó tervezése politopikus modellezéssel

A [8] kutatásban egy jármű felfüggesztés szabályozását valósítottuk meg politopikus modellezés segítségével. A publikáció fókuszában a politopikus modellezés oktatása volt. A bemutatott példa egy, a hallgatóknak kiadott házi feladat megoldási menetét hivatott bemutatni. Ebből adódóan fellelhetőek benne az oktatási példákra jellemző, elsősorban furcsának tűnő megfontolások és elhanyagolások. A példában alkalmazott negyed járműmodell sematikus felépítése a 6. ábrán látható.



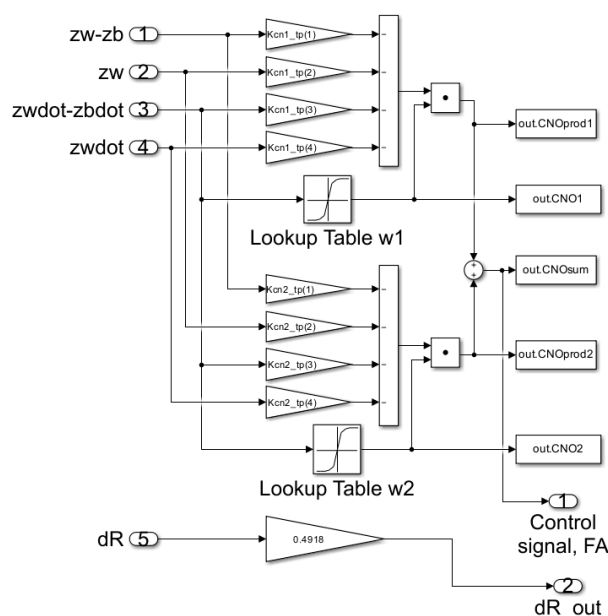
6. ábra Negyed járműmodell sematikus felépítése

Ebben a megközelítésben tisztán egyenletalapú leírást alkalmaztunk. Az LPV modell leírása a nemlineáris súrlódási modellben volt. A cél, itt, hogy a hallgató megértse, hogy hogyan lehet egy ilyen nemlinearitási problémát a politopikus modellezés eszköztárával kezelni. Itt a felfüggesztés viszkózus, coulomb és stribek súrlódási komponenseket tartalmazott. Az LPV modell ekvidisztens paramétertartományon való kiértékelését követően politóp modellt hoztunk létre a Matlab TPTtoolbox segítségével. A dinamikai modell állapotter-reprezentációja a 7. ábrán, a politopikus szabályozóviszacsatolás a 8. ábrán látható. A rendszert Matlab Simulink környezetben állítottuk össze. Ezzel tudtuk azt biztosítani, hogy az egyenletalapú rendszerbe szemléletesen integrálható legyen a politopikus rész.



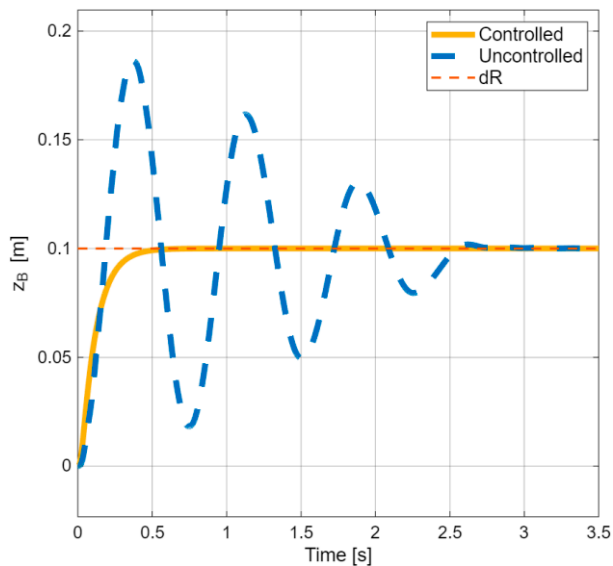
7. ábra Dinamikai modell állapotter-reprezentációja

Az állapotter-modellben a nemlineáris súrlódás egy FF függvényblokkal reprezentáltuk a B kimeneti mátrixból. A visszacsatolás dR értékei a LookupTable elemekben lévő politóp súlyfüggvények és az állapotok lineáris kombinációjából állnak elő.



8. ábra Dinamikai modell politopikus szabályozó visszacsatolása

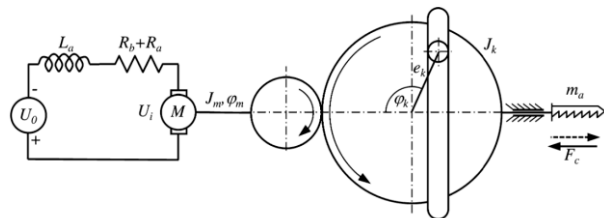
A dinamikai modell politopikus reprezentációjának csúcspontjaira (vertexeire) pólusallokációs módszerrel terveztünk egy-egy szabályozót. A vertexek közti tartomány állapotviszacsatolása ezen vertexek és súlyfüggvényeik tenzorszorzatából adódott. A szabályozó nélküli és a szabályozott rendszer karosszéria pozíciója a 9. ábrán látható. A hallgatóknak itt olyan általános megfigyelést kell tenniük, hogy a szabályozott rendszer stabilitása gyorsabban beáll, mint a nem szabályozotté. A szabályozótervezés egyéb részleteit más példákon keresztül ismerik meg.



9. ábra A szabályozó nélküli (szaggatott) és szabályozott (folytonos) rendszer karosszéria pozíciója

3.4. Kézi szűrőfűrészes nemlineáris dinamikáinak politopikus modellezése qLPV modellezés felhasználásával

A politopikus modellezés, mint az adatalapú modellezés, az egyik zászlóshajó a szabályozótervezések során. A [9] cikkben említett példában egy kézi szűrőfűrészes politopikus modellezése és a politóp átmenetek buroka gyakorolt hatása kerültek bemutatásra. A modellezett kézi szűrőfűrészes sematikus felépítése a 10. ábrán látható.

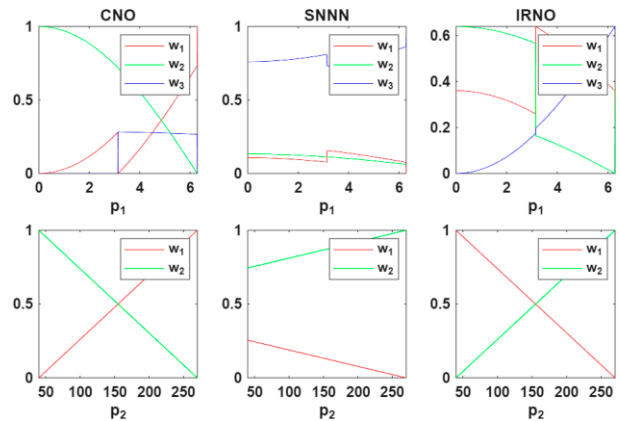


10. ábra Kézi szűrőfűrészes sematikus felépítése

Baranyi Péter és munkatársai által létrehozott Matlab TPToolbox segítségével az LPV modell pontjait kiszámolva felhasználóbarátan lehet politopikus modelleket generálni. A folyamat lényege a magasabb rendű szinguláris érték felbontás (HOSVD), melynek segítségével egy tenzor felosztható vertex tenzorok és súlyfüggvények lineáris kombinációira [5]. A 11. ábrán a felbontást követő CNO, SNNN és IRNO típusú súlyfüggvények vannak. Ezek egyen egyenként tágabb és szűkebb politópot eredményeznek, melyek hatással vannak a szabályozótervezésre. Ebben a cikkben bizonyítottuk, hogy létezik sima átmenet* ezek között a politópok között a súlyfüggvények megfelelő kombinálásával.

*A sima átmenetet úgy lehet definiálni, hogy a politóp mérete az átmenet során a nagyobb buroktól a kisebb felé

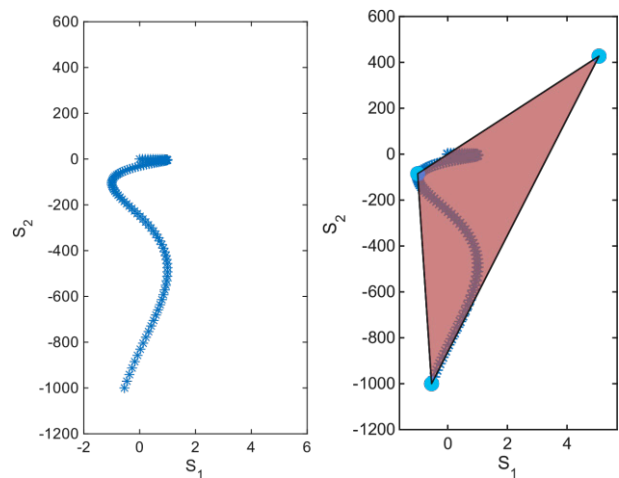
monoton csökken. A 11. ábrán a TP transzformációból adódó CNO, SNNN és IRNO politópokhoz kapcsolódó p_1 és p_2 paraméterek szerinti súlyfüggvények láthatóak.



11. ábra A TP felbontást követő CNO, SNNN, és IRNO típusú súlyfüggvények

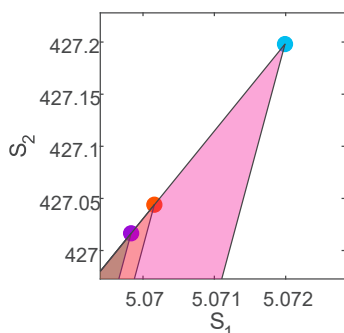
3.5. A politópok alakjának és méretének ábrázolási lehetőségei a TP átmenet alkalmazásával

A [10] cikkben egy térgörbe adatpontjaira illesztett politópokon mutattuk be a politópok méretmeghatározásának kérdéseit. A példát alkotó adatpontok és a rájuk illesztett CNO, SNNN és IRNO típusú politópok a 12. ábrán láthatóak.



12. ábra példát alkotó adatpontok és a rájuk illesztett CNO, SNNN, és IRNO típusú politópok

A politopikus modellezés egyik prominens alkalmazása a lineáris mátrix-egyenlőtlenséggel (LMI) tervezett szabályozók. Mivel az LMI szabályozótervezés során a politóp vertexei annak súlyfüggvényei nélkül vannak alkalmazva (a konvex optimalizáció természete miatt), így a burok mérete és alakja kulcsfontosságú a tervezett szabályozó szempontjából. A generált politópok jobb felső sarki vertex részlete a 13. ábrán látható.



13. ábra A generált politópok jobb felső sarki vertex részlete

A tanulmány fő konklúziója, hogy a politópok méretének valamilyen módú definiálása és értéke adott dinamikai rendszer burkainak összehasonlítására alkalmas, de a magas absztrakció miatt különböző rendszerek már nem összevethetőek. Ennek fő oka, hogy a burkok befoglaló hiperkockájának, vagy térfogatának meghatározása ugyan metrikát ad a politóp méretére, de nem lehet belőle egyértelműen következtetni arra, hogy a burok mennyire van "közel" a reprezentálandó adatpontokhoz.

3.6. Szimulációs módszerek szisztematikus összehasonlítása

Az eddig tárgyalt kutatások rövid összefoglalása segített megérteni példákon keresztül ezen módszerek sajátosságait. A továbbiakban szükségessé válik egy szisztematikus összehasonlítási rendszer ismertetése, mely segít a holisztikus megértésben.

Az 1. táblázat egységes szempontrendszerbe foglalja a cikkben bemutatott esettanulmányok módszereit és szoftvereit.

Általánosságban elmondható, hogy a modellezési eljárás egyszerűsítésével jellemzően romlik annak rugalmassága és fordítva is. További általános megfigyelés, hogy a költséghatékony szimuláció matematikához és géphez közelebb módszereknek érhető el. Ez igazolja azt, hogy az újabb ember közelebbi módszerek nem jobbak általánosságban, csak egyszerűségük miatt nagyobb publicitást kapnak.

1. táblázat A vizsgált modellezési és szabályozási környezetek összehasonlítása

Összehasonlítási szempont	AVL Cruise	MATLAB Simulink	MATLAB Simscape	TPToolbox (Politopikus mód.)
Modellezés megközelítése	Adataalapú / Makroszkopikus	Analitikus / Blokk-orientált (Jelfolyam)	Hibrid / Fizikai hálózat (Egyenletalapú)	Analitikusból transzformált / LPV
Modellépítés módja	Kész rendszerelemek paraméterezése, mérések illesztése	Matematikai differenciál-egyenletek és hatásvázlatok grafikus felírása	Komponensek fizikai topológia szerinti összekötése (tartományspecifikus)	HOSVD alapú tenzorfelbontás lineáris (LTI) vertexekre
Fő alkalmazási terület (a cikk alapján)	Hibridizáció, WLTP fogyasztásvizsgálat, hajtáslánc méretezés	Általános járműdinamika, klasszikus szabályozások (Powertrain Blockset)	Többfizikai rendszerek, valós idejű HIL tesztelés (ABS vizsgálatok)	Nemlineáris, robusztus szabályozótervezés (LMI alapokon)
Számítási kapacitásigény	Alacsony	Közepes	Magas (a merev egyenletek és nulla-átmenetek miatt)	Magas (tervezéskor), Alacsony (valós idejű futtatáskor)
Kiemelt előny	Gyors rendszerszintű elemzés iteratív mérésekkel	Átláthatóság, egyedi algoritmusok könnyű implementálása	Valósághű ág-csomópont reprezentáció, topológiai hűség	Garantált globális stabilitás a teljes nemlineáris tartományon
Kritikus korlát	Önvezetés vagy finomdinamika vizsgálatára nem alkalmas	Bonyolult fizikai kölcsönhatásoknál a felírás nehézkes	A hirtelen állapotátmenetek (pl. 0 km/h) szimulációs instabilitást okozhatnak	A paraméterek számával exponenciálisan nő a vertexek száma (dimenzióátok)

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Összefoglalva, a gépészeti rendszerek hatékony tervezésének alapját a megfelelő modellezési megközelítés kiválasztása képezi, amely egyensúlyt teremt a modell pontossága és a számítási erőforrások igénye között. A bemutatott példák rámutattak arra, hogy különböző alkalmazások – legyen szó járművekről vagy kisebb mechanikai eszközökről – eltérő modellezési stratégiákat igényelnek, amelyek az adott probléma komplexitásához és céljához illeszkednek.

Az ismertetett szoftverkörnyezetek, mint az AVL Cruise, a Matlab Simulink és Simscape, valamint a TPToolbox, jól szemléltetik, hogy a modern mérnöki gyakorlatban a több szinten történő modellezés és szimuláció elengedhetetlen. Külön kiemelhető a politóp alapú módszerek szerepe, amelyek lehetőséget biztosítanak nemlineáris rendszerek hatékony kezelésére és korszerű szabályozási eljárások alkalmazására.

A kutatás eredményei alapján megállapítható, hogy a megfelelően megválasztott modellezési és szabályozási eszközök jelentősen hozzájárulnak a tervezési folyamatok optimalizálásához, a fejlesztési idő csökkentéséhez, valamint a rendszerek megbízhatóságának és teljesítményének növeléséhez. A bemutatott módszerek és eszközök így releváns támogatást nyújtanak a jövő mérnöki kihívásainak kezelésében

5. SUMMARY

In summary, the basis for the effective design of mechanical systems is the selection of the appropriate modeling approach, which creates a balance between the accuracy of the model and the need for computational resources. The presented examples have shown that different applications – be it vehicles or smaller mechanical devices – require different modeling strategies that match the complexity and purpose of the given problem.

The described software environments, such as AVL Cruise, Matlab Simulink and Simscape, and TPToolbox, clearly illustrate that multi-level modeling and simulation are indispensable in modern engineering practice. The role of polytope-based methods can be particularly emphasized, which provide an opportunity to effectively handle nonlinear systems and apply modern control procedures.

Based on the results of the research, it can be concluded that properly selected modeling and control tools significantly contribute to the optimization of design processes, reduction of development time, and increase of system reliability and performance. The presented methods and tools thus provide relevant support in addressing future engineering challenges.

6. IRODALOM

- [1] Hans B. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*. Elsevier, 2012. doi: 10.1016/C2010-0-68548-8.
- [2] Lennart Ljung, “System Identification: Theory for the User,” *Prentice Hall information and system sciences series*, vol. 609, 1999.
- [3] J. S. Shamma, “An Overview of LPV Systems,” in *Control of Linear Parameter Varying Systems with Applications*, Boston, MA: Springer US, 2012, pp. 3–26. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1833-7_1.
- [4] U. Kiencke and L. Nielsen, *Automotive Control Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. <https://doi.org/10.1007/b137654>.
- [5] P. Baranyi, “TP Model Transformation as a Way to LMI-Based Controller Design,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 2, pp. 387–400, Apr. 2004, <https://doi.org/10.1109/TIE.2003.822037>.
- [6] D. Nemes and S. Hajdu, “Vehicle Dynamics Modelling of the Mercedes-Benz REFORM 501 LE Urban Bus by Using AVL Cruise Software,” 2023, pp. 793–798. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_65.
- [7] D. Nemes and S. Hajdu, “Mechanical Design and Simulation of Electric Vehicles for Sustainable Mobility,” 2025, pp. 737–746. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80512-7_72.
- [8] D. Nemes, R. Mikuska, S. Hajdu, and P. Korondi, “Poly Topic Model and Control of a Friction-Enhanced Quarter Vehicle (Education of Datadriven Modelling),” in *2025 IEEE 12th International Conference on E-Learning in Industrial Electronics (ICELIE)*, IEEE, Oct. 2025, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICELIE64733.2025.11244765>.
- [9] D. Nemes, “A Systematic Strategy for TP Modeling: A Use Case Study of the Jigsaw System.”
- [10] D. Nemes and S. Hajdu, “Possibilities for Representing the Shape and Size of Polytopes when Applying the Tp Transition,” Aug. 2026, pp. 259–265. <https://doi.org/10.4028/p-RA6j9q>.

TOYOTA AVENSIS JÁRMŰPARAMÉTEREK MÉRÉSE JÁRMŰDINAMIKAI MODELL VALIDÁLÁSÁHOZ

MEASUREMENT OF TOYOTA AVENSIS VEHICLE PARAMETERS FOR VEHICLE DYNAMICS MODEL VALIDATION

Csajbók Imola Lenke^{*}, Nemes Dániel^{**}

ABSTRACT

A reliable vehicle dynamics model requires not only a suitable simulation environment, but also experimentally obtained data for parameter identification and validation. This paper presents a measurement and data-processing workflow developed for a MATLAB–Simulink longitudinal vehicle dynamics model. Road tests were carried out on a 2012 Toyota Avensis using a CANedge2 data logger connected to the vehicle's OBD-II port, enabling the logging of signals such as vehicle speed, engine speed, accelerator pedal position and brake pressure. The recorded MF4 datasets were decoded with DBC databases, filtered, resampled, and finally converted into timeseries format suitable for Simulink simulation input. The measured signals were then compared with the simulation results to evaluate the model's accuracy in depicting the actual behaviour of the vehicle. In addition, engine braking sections were selected from which linear deceleration characteristics could be determined as a reference for parameter estimation. Rather than focusing solely on simulation outputs, the study aims to present a practical and repeatable method for CAN-based data processing and vehicle model validation. The proposed framework provides a baseline for the development of more accurate longitudinal vehicle dynamics models. Details of this research were published in the article [1].

Egy megbízható járműdinamikai modellhez nem elegendő egy megfelelő szimulációs környezet, hanem a paraméterek azonosításához és validálásához szükség van kísérletileg nyert adatokra is. Ez a cikk egy MATLAB–Simulink longitudinális járműdinamikai modellhez kidolgozott mérési és adatfeldolgozási munkafolyamatot mutat be. Az utakon végzett tesztek egy 2012-es Toyota Avensis járművön lettek elvégezve egy CANedge2 adatgyűjtő segítségével, amely a jármű OBD-II portjához lett csatlakoztatva. Ez az eszköz lehetővé tette különböző jelek rögzítését, mint például a jármű sebessége, a motor fordulatszáma, a gázpedál állása és a féknyomás. A rögzített MF4 adatsorok DBC adatbázisok segítségével lettek dekódolva, szűrve, mintavételezve, majd végül a Simulink modell bemenetéhez megfelelő

timeseries formátumba konvertálva. Ezt követően a mért jelek összehasonlításra kerültek a szimulációs eredményekkel, hogy meg lehessen ítélni a modell megbízhatóságát a jármű tényleges viselkedésének leírásában. Ezenkívül olyan motorfék szakaszok kerültek kiválasztásra, amelyekből lineáris lassulási jellemzők határozhatók meg, és amelyek referenciaként alkalmazhatók a paraméterbecsléshez. A tanulmány nem kizárólag a szimulációs eredményekre összpontosít, hanem egy gyakorlati és megismételhető módszert kíván bemutatni a CAN-alapú adatfeldolgozáshoz és a járműmodell-validáláshoz. A javasolt keretrendszer alapot biztosít pontosabb longitudinális járműdinamikai modellek fejlesztéséhez. Jelen kutatás részletei a [1] cikkben publikálva lettek.

1. BEVEZETÉS

A modern járművek egyre bonyolultabb szerkezeti, elektronikai elemekkel és mechatronikai rendszerekkel rendelkeznek, amik működésük során jelentős mennyiségű adatot generálnak. Az egyre újabb megoldások az üzemfenntartás színvonalának folyamatos fejlődését követelik, ezért egyre nagyobb szerepet kapnak az állapotfüggő karbantartási rendszerek. A Controller Area Network (CAN) hálózat lehetővé teszi a jármű különböző elektronikus vezérlőegységei (ECU) közötti strukturált és szabványos kommunikációt, ezáltal lehetőséget biztosít számos fontos működési paraméter nyomon követésére és elemzésére. Ezek az adatok használhatóak diagnosztikai célokra, illetve járműdinamikai modellek fejlesztésére és validálására.

A járműdinamikai modellek széles körben alkalmazott eszközök a járművek viselkedésének elemzésére és szimulációjára [2]. Az irodalomban számos különböző modell található, például negyedjármű- [3], féljármű- vagy teljes járműmodellek [4-6], amelyek különböző részletességgel írják le a jármű mozgását. Ezek a modellek gyakran a laterális dinamikára vagy az utazási kényelemre helyezik a hangsúlyt. [7, 8] Számos alkalmazás esetében azonban elegendő lehet egy egyszerűbb, kizárólag a jármű

^{*} MSc hallgató, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

^{**} tanársegéd, Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

hosszanti (longitudinális) mozgását leíró modell alkalmazása. Az ilyen modellek előnye az egyszerűség és a gyors számítási idő, azonban a pontosságuk nagymértékben függ a modellben szereplő paraméterek helyes megválasztásától.

A jármű hosszanti mozgását befolyásoló legfontosabb ellenállási erők közé tartozik a gördülési ellenállás, a légellenállás, valamint a hajtáslánc veszteségei. Ezek közül a gördülési ellenállás jelentős szerepet játszik különösen alacsony és közepes sebességtartományban.

A jelen kutatás célja egy egyszerű hosszanti járműdinamikai modell paraméterezéseinek előkészítése mért járműadatok felhasználásával, különös tekintettel a gördülési ellenállás paraméterének meghatározására.

2. MÉRÉSI KÖRNYEZET ÉS A LONGITUDINÁLIS MODELL FELÉPÍTÉSE

2.1. Mérőeszköz

A járműadatok méréséhez a dán CSS Electronics által kifejlesztett CANedge2 eszközt (1. ábra) használtuk, amely kontrollált módon képes a CAN-hálózat üzeneteinek rögzítésére.

A készülék egyik legfontosabb jellemzője a nagy pontosságú, folyamatos és időbélyeggel ellátott adatrögzítés, amely akár két CAN-csatornán párhuzamosan is megvalósítható. A CANedge2 rugalmasan paraméterezhető: a felhasználók online vagy offline konfigurációs editor segítségével szabhatják testre a működési jellemzőket. Az eszköz az áramellátás megjelenésekor azonnal, teljesen automatikusan megkezd az adatgyűjtést az SD-kártyára. Lehetőség van mért GPS modul csatlakoztatására is.



1. ábra: A CANedge2 mérőeszköz és az OBD2 kábel

2.2. Vizsgált jármű

Méréseinket egy olyan 2012-es évjáratú Toyota Avensis 2.0 D-4D típusú autón végeztük, mint ami a (2.ábrán) látható.



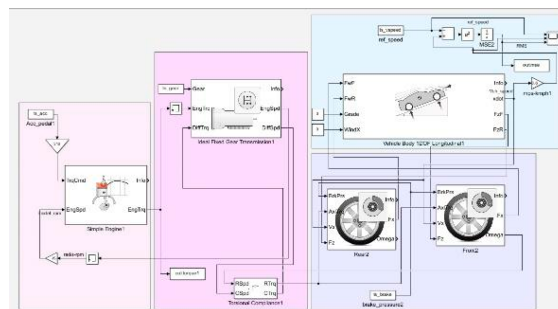
2. ábra: Toyota Avensis 2012

2.3. Járműdinamikai modell

Ahogy a bevezetésben is olvasható, a szakirodalomban gyakran előforduló járműmodellek, mint például a kerékpár-, negyedautó-, fél- vagy teljes autó-modellek általában konkrét célokra lettek kialakítva, és nem mindig alkalmasak általános felhasználásra. Kezdetben az volt a célkitűzés, hogy egy egyszerű, testreszabható modellt használjunk, amelyet a CANedge2 eszközzel rögzített mérési adatokhoz lehet igazítani. A legtöbb rendelkezésre álló modell az oldalirányú dinamikán alapul, azaz magába foglalja a kormányzás és a kanyarodás hatásait, míg elsődleges célunk a hosszirányú viselkedés vizsgálata volt. Ezért egy erősen leegyszerűsített hosszirányú modellt fejlesztettünk ki MATLAB környezetben (3. ábra), amelyben olyan egyenes vonalú mozgást elemeztünk, ahol az autó álló helyzetből indult [9, 13]. Ha ez az egyszerű modell megfelelően ábrázolja a valós adatokat, akkor a modell bonyolultabbá tehető, és például beépíthető a kormányzás is. Az alkalmazott blokkok az alábbiak:

- Vehicle Body 1DOF Longitudinal
- Simple Engine
- Ideal Fixed Gear
- Torsional Compliance
- Longitudinal Tire Disc Brake

Ezekon kívül egységátváltáshoz *Gain*, a függő jelek elkerüléséhez *Memory* és *Delay*, valamint a modell ellenőrzéséhez és a kimenetek megjelenítéséhez *Scope* blokkokat használtunk. A mért CAN-adatokból a gázpedál állását, a féknyomást, a jármű sebességét, majd később a számított fokozatot „timeseries” formátumban töltöttük be a szimulációs környezetbe a *From Workspace* blokkok segítségével. [1]



3. ábra: A longitudinális járműmodell MATLAB-Simulink környezetben

2.4. Adatgyűjtés és elemzés

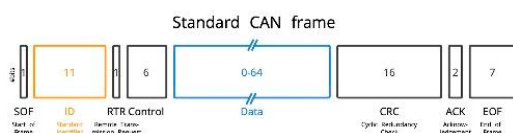
A kutatás során 2025 augusztusa és októbere között végeztünk méréseket változó útviszonyok mellett, városi és autópályás forgalomban egyaránt. A vizsgálatok alatt módosítottuk a mintavételezési periódust az optimális beállítás meghatározása érdekében. A rögzített adatmennyiség elegendőnek bizonyult a modell teszteléséhez, validálásához, valamint a jármű dinamikai viselkedésének alapszintű elemzéséhez. Az adatgyűjtés folyamata az alábbi szakaszokra bontható [1]:

2.4.1. Konfiguráció és OBD-II kérések meghatározása

A mérések megkezdése előtt a CANedge2 eszközt a vizsgált jármű sajátosságaihoz kellett igazítani, mivel az OBD-II kérések és a CAN-hálózati struktúrák típusfüggőek. A konfiguráció a CSS Electronics „OBD PID lookup tool” [14] online szerkesztőjében történt, ahol egy próbamérés után látni lehetett a támogatott PID-ek listáját a válaszüzenetek bitstruktúrája alapján. A kiválasztott jelekhez (pl. gázpedálállás, féknyomás) szintén a CSS Electronics által biztosított online konfigurációs eszközt használva beállítottuk a bit-módot (standard/extended), a lekérdezési gyakoriságot és a válaszformátumot, majd a konfigurációs fájlt rámásoltuk egy SD-kártyára, amit behelyeztünk az eszközbe.

2.4.2. Adatrögzítés és dekódolás

A mérések során az eszközt a kormánykerék alatt található OBD2-portba csatlakoztattuk. Az adatgyűjtés a gyújtás ráadásakor automatikusan elindul, és a leállításig tart; az aktív rögzítést az eszköz LED-ekkel jelzi. Az adatok MF4 formátumban tárolódnak. A nyers CAN-üzenetek (4. ábra) fizikai paraméterekké alakításához (dekódolásához) az open-source, Python-alapú asammdf szoftvert alkalmaztuk.



4. ábra: Standard CAN-üzenet felépítése [13]

A dekódoláshoz elengedhetetlen egy vagy több megfelelő DBC adatbázis (fájl) használata, amely leírja a bitek jelentését és a skálázási faktorokat. A kutatás korai szakaszában több adatbázist is összehasonlítottunk, mivel a mértékegységekben és struktúrákban jelentős eltérések mutatkoztak. A pontos eredmények érdekében végül több adatbázis egyidejű alkalmazása mellett döntöttünk.

2.4.3. Szűrés és előfeldolgozás

A valós forgalomban rögzített adatokból Python kód segítségével választottunk ki egyenes szakaszokat, hiszen a longitudinális modellhez ezek szükségesek.

A kinyert szegmenseket .csv és .mat formátumban exportáltuk, majd MATLAB környezetbe importáltuk. A változókat vektorokká alakítottuk át (ügyelve arra, hogy mindegyik következetesen sor- vagy oszlopvektor legyen, mivel ellenkező esetben nem lehetett volna őket megfelelően felhasználni). Ezután „timeseries” formátumra konvertáltuk őket a Simulink-modellbe való betöltéshez. Az adatokon interpolációs újramintavételezést (resampling) végeztünk egy közös idővektor mentén. Ez biztosította, hogy minden bemeneti paraméter azonos időlépéssel rendelkezzen, ami lehetővé tette a modellszimuláció gyorsabb és stabilabb futtatását. Végül egy újabb MATLAB-kódot írtunk a szimuláció és a modell eredményeinek egy közös grafikonon történő ábrázolásához, hogy gyorsabban ellenőrizhetőek legyenek az eredmények.

3. OPTIMALIZÁLÁS ELŐKÉSZÍTÉSE

A járműdinamikai modellek pontossága nagymértékben függ a modellben szereplő paraméterek helyes megválasztásától, és elengedhetetlennek tartják a szimulációs eredmények megbízhatóságának és alkalmazhatóságának biztosításához. [10] A validálási eljárások során jellemzően a mért és a szimulált jeleket hasonlítják össze meghatározott üzemi feltételek mellett, figyelembe véve a modell feltételezéseit, a jelek rendelkezésre állását és a mérési bizonytalanságot. [11, 12]. Bár számos paraméter, például a jármű tömege vagy geometriai adatai közvetlenül meghatározható a jármű műszaki adataiból, egyes paraméterek értéke csak közelítő módon ismert, vagy jelentős mértékben függ az aktuális üzemi körülményektől [10]. Ilyen paraméter például a gördülési ellenállás, amely a gumiabroncsok és az útfelület kölcsönhatásából [15] származó hatásokat foglalja magába. A modell pontosítása érdekében ezért szükséges ezen paraméterek mért adatok alapján történő illesztése, amihez gyakran optimalizációs módszereket alkalmaznak.

A járműdinamikai modell paramétereinek meghatározásához szükséges volt olyan méréseket végezni, amelyek alkalmasak a jármű lassulási viselkedésének vizsgálatára. Ehhez álló helyzetből felgyorsítottuk a járművet 1-es fokozatban, majd kuplung lenyomása nélkül hagytuk visszalassulni. Ezt többször megismételtük, majd ugyanezt 2-es fokozatban is elvégeztük. A gördülési ellenállás paraméterének becsléséhez a mérésekből kiválasztottuk a motorfékes szakaszokat. Ezekben a szakaszokban a jármű sebessége a különböző ellenállási erők hatására csökken, miközben a hajtáslánc zárt állapotban marad, mivel a kuplung nincs benyomva. Motorfékes üzemben a jármű lassulását több tényező együttes hatása határozza meg. Ezek közé tartozik a gördülési ellenállás, a hajtáslánc veszteségei, a motorfékből származó ellenállás, valamint kisebb mértékben a légellenállás. A hajtáslánc hatékonyságát befolyásoló, terhelésfüggő veszteségek a sebesség és az üzemeltetési körülmények függvényében jelentősen

változnak. [16-18] A jelen vizsgálat során elsősorban az alacsony sebességtartományra koncentráltunk, ahol a légellenállás hatása viszonylag kicsi, így a lassulást elsősorban a gördülési ellenállás és a motorfékből származó hatások befolyásolják.

A mért adatok ábrázolása után azonosítottuk azokat az időintervallumokat, amelyekben a sebesség-idő görbe közel lineáris csökkenést mutatott, ezek a szakaszok alkalmasak a jármű lassulásának becslésére. Ezután minden egyes kiválasztott időintervallumban lineáris illesztést végeztünk a sebesség-idő adatokra a MATLAB polyfit függvényének segítségével, majd átlagoltuk a kapott meredekségeket, így kapva egy referencia meredekséget, ami majd az optimalizáció során alapul szolgál.

A jelen munka elsősorban az adatok előkészítésére és a mérési folyamat kidolgozására fókuszált. A meghatározott lassulási értékek alapul szolgálnak a modell paramétereinek későbbi, optimalizációs módszerekkel történő azonosításához. A jövőben célunk a gördülési ellenállás pontosabb meghatározása olyan mérésekkel is, ahol a jármű üresben gurul, így a motorfék hatása már nem érvényesül.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A járműdinamikai modellek fontos szerepet játszanak a jármű viselkedésének megértésében és előrejelzésében különböző üzemeltetési körülmények között. Ez a tanulmány egy MATLAB–Simulink alapú hosszirányú járműdinamikai modell kidolgozására [1], valamint a gördülési ellenállás és a motorfék paramétereinek meghatározásához szükséges mérési és feldolgozási munkafolyamat bemutatására törekszik. A kutatás során egy 2012-es Toyota Avensis jármű adatait rögzítettük CANedge2 adatgyűjtő segítségével valós közlekedési körülmények között. A nyers CAN-busz üzenetek dekódolását, szűrését és előfeldolgozását követően azonosítottuk a jármű lassulási viselkedésének elemzésére alkalmas motorfék-szakaszokat. A sebesség-idő adatok lineáris illesztésével meghatározott lassulási meredekségek referenciaértékeként szolgálnak a modell későbbi, optimalizálási módszerekkel történő paraméterezéséhez. A bemutatott eljárás célja a motorfék-ellenállás és a gördülési ellenállás pontos azonosításának előkészítése. A kifejlesztett keretrendszer [1] reprodukálható alapot biztosít a modell további finomításához és a hajtáslánc-dinamika részletesebb integrálásához.

5. SUMMARY

Vehicle dynamics models are important for understanding and predicting vehicle behavior under different operating conditions. This study focuses on the development of a MATLAB–Simulink-based longitudinal vehicle dynamics model [1], as well as on presenting the measurement and processing workflow required for identifying rolling resistance and engine

braking parameters. During the research, data from a 2012 Toyota Avensis vehicle was recorded using a CANedge2 data logger in real-world traffic conditions. Following the decoding, filtering, and preprocessing of the raw CAN bus messages, engine braking sections suitable for analyzing the vehicle's deceleration behavior were identified. The deceleration slopes determined by linear fitting of the speed-time data serve as reference values for the subsequent parameterization of the model using optimization methods. The purpose of the presented procedure is to prepare for the accurate identification of engine braking resistance and rolling resistance. The developed framework [1] provides a replicable basis for further refinement of the model and more detailed integration of drivetrain dynamics.

6. IRODALOM

- [1] Csajbók I. L., Nemes D., *Measurement of vehicle parameters for vehicle dynamics model validation*, 11th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME), publikálásra elfogadva
- [2] Reicherts S., Hesse B. S., Schramm D.: *Use of naturalistic driving studies for identification of vehicle dynamics*. IEEE Open Journal of Intelligent Transport Systems, 2. évfolyam. (2021) 195–206.
<https://doi.org/10.1109/OJITS.2021.3093712>
- [3] De Hoyos Fernández de Córdova A., Olazagoitia J. L., Gijón-Rivera C.: *Non-Invasive Identification of Vehicle Suspension Parameters: A Methodology Based on Synthetic Data Analysis*. Mathematics, 12. évfolyam/3. szám. (2024) 397.
<https://doi.org/10.3390/math12030397>
- [4] Parra A., Cagigas D. – Zubizarreta A.: *Modelling and Validation of Full Vehicle Model based on a Novel Multibody Formulation*. In: IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Lisszabon, Portugália, 2019.
[10.1109/IECON.2019.8926854](https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8926854)
- [5] Ahmad F., Mazlan S., Jamaluddin H., Hudha K.: *Modelling and Validation of the Vehicle Longitudinal Model*. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 10. évfolyam. (2022) 2042–2056.
<https://doi.org/10.15282/ijame.10.2014.21.0172>
- [6] Wu Z., Kang C., Li B.: *Dynamic Modeling, Simulation, and Optimization of Vehicle Electronic Stability Program Algorithm Based on Back Propagation Neural Network and PID Algorithm*. Actuators, 3. évfolyam/13. szám. (2024) 100.
<https://doi.org/10.3390/act13030100>
- [7] Wang P., Wang J., Li Z., Qu T.: *Koopman-MPC-based energy-efficient integrated control of attitude maneuver and vibration suppression for nonlinear in-wheel motor-*

- active suspension on uneven roads. *Energy*, 336. évfolyam. (2025) 138157.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138157>
- [8] Haidar F.: *Integrated Vehicle Dynamics Modeling, Path Tracking, and Simulation: A MATLAB Implementation Approach*. Engineering Perspective, 1. évfolyam/1. szám. (2024) 7–16.
<https://doi.org/10.29228/eng.pers.75106>
- [9] Laila D., Shakouri P., Ordys A. – Askari M.: *Longitudinal vehicle dynamics using Simulink/Matlab*. In: UKACC International Conference on Control. Coventry, Egyesült Királyság, 2010.
<https://doi.org/10.1049/ic.2010.0410>
- [10] Widner A., Tihanyi V., Tettamanti T.: *Framework for Vehicle Dynamics Model Validation*. IEEE Access, 10. évfolyam. (2022) 35422–35436.
[10.1109/ACCESS.2022.3157904](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3157904)
- [11] Rhode S. – Von Keler J.: *Online validity monitor for vehicle dynamics models*. In: 2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE). Graz, Ausztria, 2019.
[10.1109/ICCVE45908.2019.8965162](https://doi.org/10.1109/ICCVE45908.2019.8965162)
- [12] Danquah B., Riedmaier S., Rühm J.: *Statistical Model Verification and Validation Concept in Automotive Vehicle Design*. Procedia CIRP, 91. évfolyam. (2020) 261–270.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.175>
- [13] Rill G., Castro A. A.: *Road Vehicle Dynamics: Fundamentals and Modeling with MATLAB®*. CRC Press, Boca Raton, 2020.
<https://doi.org/10.1201/9780429244476>
- [14] CSS Electronics. (letöltve: 2026. március 14.).
- [15] Pacejka H. B., Besselink I.: *Tyre and vehicle dynamics*. 2. edition. Butterworth-Heinemann Elsevier, Oxford Waltham, 2006.
- [16] Minaker B. P.: *Fundamentals of vehicle dynamics and modelling: a textbook for engineers with illustrations and examples*. Wiley, Hoboken, NJ, 2020.
- [17] Gillespie T. D.: *Fundamentals of Vehicle Dynamics (Revised Edition)*. SAE International, Warrendale, Pennsylvania, 2021.
- [18] Lugner P.: *Vehicle dynamics of modern passenger cars*. Springer International Publishing, Cham, 2019.

AZ ESZTERGA SZERSZÁMGÉPEK FEJLŐDÉSE: A KÉZI HAJTÁSTÓL A CNC TECHNOLÓGIÁIG

THE DEVELOPMENT OF LATHE MACHINE TOOLS: FROM MANUAL OPERATION TO CNC TECHNOLOGY

Dr. Bodzás Sándor*

ABSZTRAKT

Az eszterga szerszámgépek fejlődése szorosan összefügg az ipari termelés technológiai átalakulásával. A publikáció bemutatja az esztergagépek történeti fejlődésének főbb állomásait a kézi hajtású szerkezetektől kezdve a hagyományos mechanikus megoldásokon át egészen a korszerű CNC-vezérlésű szerszámgépekig. Az elemzés kitér a technológiai innovációk termelékenységre, pontosságra és automatizálásra gyakorolt hatásaira, valamint arra, hogy a CNC technológia miként alakította át a modern forgácsolóipart. A tanulmány célja átfogó képet adni az esztergagépek fejlődésének gépészeti és ipari jelentőségéről.

ABSTRACT

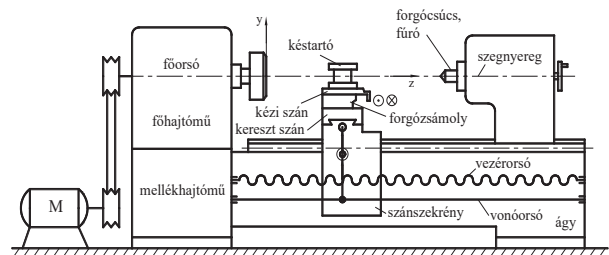
The development of lathe machine tools is closely related to the technological transformation of industrial production. This publication presents the main stages in the historical evolution of lathes, from manually operated machines through conventional mechanical solutions to modern CNC-controlled working machines. The analysis highlights the impact of technological innovations on productivity, precision, and automation, as well as the ways in which CNC technology has transformed the modern machining industry. The aim of the study is to provide a comprehensive overview of the technical and industrial significance of lathe development.

1. BEVEZETÉS

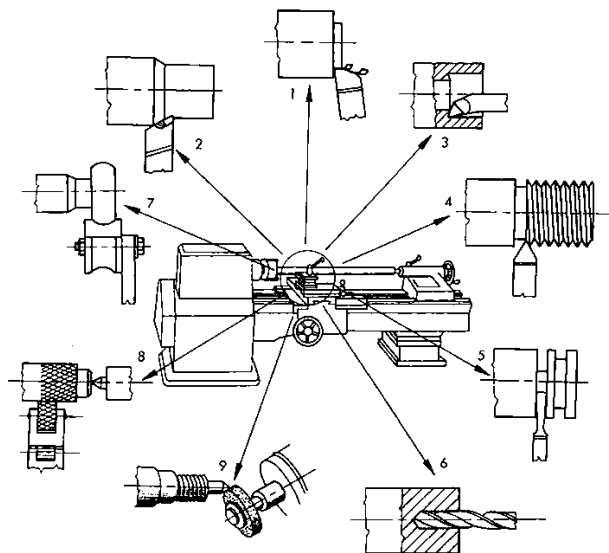
Az esztergálás a forgácsoló megmunkálások egyik legfontosabb és legelterjedtebb eljárása, amely meghatározó szerepet tölt be a gépipar, a járműgyártás, valamint a precíziós alkatrészgyártás területén. Az esztergagépek fejlődése szorosan összefügg az ipari termelés technológiai fejlődésével, hiszen a gyártási pontosság, a termelékenység és az automatizálás iránti növekvő igény folyamatos innovációra ösztönözte a szerszámgépgyártást. Az évszázadok során a kezdetleges kézi hajtású eszközökből fokozatosan nagy pontosságú, számítógép-vezérelt berendezések alakultak ki, amelyek napjaink modern gyártórendszerének alapvető elemei.

Az esztergálás során a munkadarab forgómozgást végez, miközben a szerszám előtoló mozgással eltávolítja a felesleges anyagot a kívánt geometria kialakítása érdekében. Az eljárás széles körben alkalmazható hengeres, kúpos, menetes és egyéb forgásszimmetrikus alkatrészek gyártására, ezért az egyik legsokoldalúbb forgácsolási technológiának tekinthető (1., 2. és 3. ábra) [22, 23].

Az esztergagépek fejlődése jelentős hatással volt a megmunkálási pontosság növelésére, a gyártási idő csökkentésére, valamint a sorozatgyártás hatékonyságának javítására.



1. ábra. Egyetemes esztergagép felépítése [21]

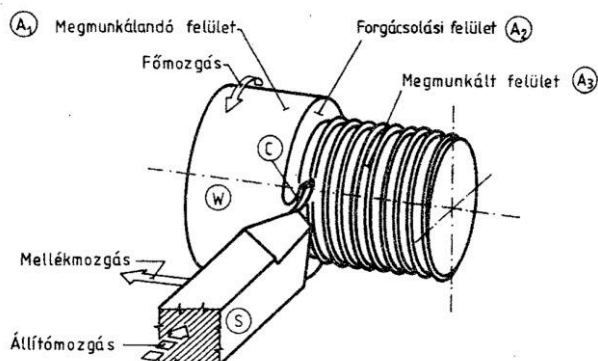


2. ábra. Jellegzetes eszterga műveletek [21]

A tanulmány célja áttekinteni az eszterga szerszámgépek fejlődésének legfontosabb állomásait a

* egyetemi docens, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék

kézi hajtású szerkezetektől egészen a korszerű CNC-technológiáig. A tanulmány bemutatja az ipari forradalom hatását, az automatizálás megjelenését, valamint a digitális vezérlésű rendszerek kialakulását és ipari jelentőségét. Emellett röviden ismerteti a modern gyártási trendeket, különös tekintettel az Ipar 4.0 és az intelligens gyártórendszerek térnyerésére.

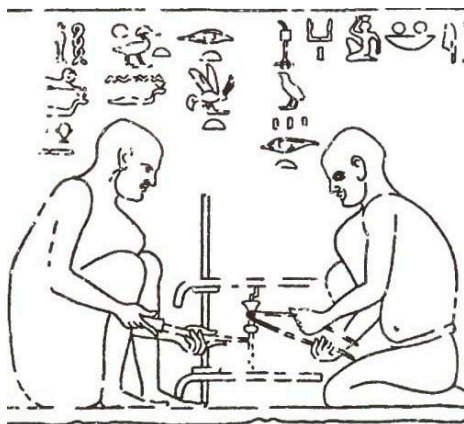


3. ábra. A munkadarab felületei, jellegzetes mozgások [22]

2. AZ ELSŐ ESZTERGAGÉPEK ÉS A KÉZI HAJTÁS KORSZAKAI

Az esztergálás története több ezer évre nyúlik vissza, és a legkorábban alkalmazott forgácsolási eljárások közé tartozik (Kr. e. 1300).

Az első primitív esztergagépek már az ókori Egyiptomban és Görögországban jelentek meg, ahol főként faanyagok megmunkálására használták őket. Ezek a kezdetleges szerkezetek emberi erővel működtek, a munkadarab forgatását kézzel vagy kötél segítségével végezték (4. ábra). Az egyszerű kialakítás ellenére ezek az eszközök jelentős előrelépést jelentettek a kor kézműiparában, mivel lehetővé tették forgásszimmetrikus alkatrészek kialakítását.



4. ábra. A kézi forgácsolás kezdeti formája (Kr. e. 300 körül) [1]

A korai esztergagépek egyik legismertebb típusa az íjhajtású eszterga volt (5. ábra). Ennél a megoldásnál egy íjhoz rögzített kötél forgatta a munkadarabot oda-vissza

irányú mozgással. A megmunkálás gyakran két ember összehangolt munkáját igényelte: egyikük a forgatást végezte, míg a másik a szerszámot vezette.



5. ábra. Íjhajtású eszterga (Kr. e. 3–1. század) [2]

A későbbi fejlődési szakaszban jelentek meg a lábajtású esztergák, amelyek pedálos mechanizmussal biztosították a folyamatosabb forgómozgást. Ez javította a megmunkálás pontosságát és hatékonyságát, valamint csökkentette a kezelő fizikai terhelését (6. ábra).



6. ábra. Lábajtású eszterga [3]

A középkor (kb. 476 – 1492) és a reneszánsz időszakában (kb. 1300 – 1600) az esztergagépek szerkezeti kialakítása tovább fejlődött. Megjelentek a stabilabb gépvázak, az egyszerű szánrendszerek és a pontosabb szerszámvezetési megoldások. Az esztergálást ekkor már nemcsak fa-, hanem egyre gyakrabban fémmegmunkálásra is alkalmazták. A kézi hajtású rendszerek azonban továbbra is korlátozott teljesítménnyel rendelkeztek, ezért a gyártási pontosság és termelékenység nagymértékben függött a kezelő tapasztalatától és fizikai erejétől. Ezek a korlátok teremtették meg az igényt a későbbi mechanikus és ipari hajtású esztergagépek kifejlesztésére.

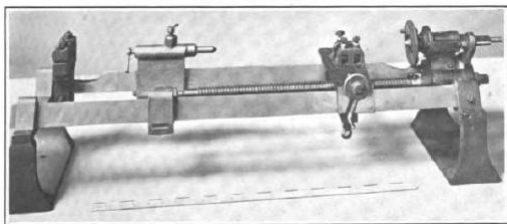
3. AZ IPARI FORRADALOM HATÁSA AZ ESZTERGAGÉPEK FEJLŐDÉSÉRE

Ez a korszak az esztergálás történetének legmeghatározóbb fordulópontja (kb. 1760 - 1900-as

évek). Ekkor vált le az eszterga az emberi vagy állati erővel hajtott, fából készült kézműves szerszámokról, és alakult át valódi, precíziós ipari géppé.

Henry Maudslay (Anglia, 1797 körül) kifejlesztette a csavart esztergáló gépet vezetőorsóval és állítható szánnal, ami lehetővé tette a pontos menetesztergálást (7. ábra). A gép működése röviden:

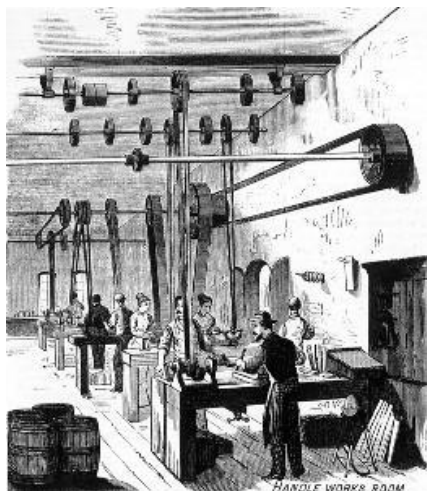
- az eszterga két háromszögprofilú sínre épül, amelyeken a szerszámszán csúszkája mozog, miközben a munkadarab forgásban van,
- a vezető orsó a főorsóval együtt mozog, és a csereáttételeken keresztül különböző menetemelkedéseket képes kialakítani,
- a szánnra csavarment mélységét mikrométerrel lehet szabályozni.



7. ábra. Maudslay csavart esztergáló gépe (1797) (méretpontosság kb. $\pm 0,05$ – $0,2$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=3,2$ – $12,5$ μm) [4]

Az ipari forradalom jelentős változásokat hozott a gyártás és a gépípar területén, amelyek az esztergagépek fejlődésére is nagy hatással voltak. A gőzgépek megjelenése lehetővé tette a mechanikus hajtás alkalmazását, amely jelentősen növelte a gépek teljesítményét (kezdetben 5–20 kW, később akár 100+ kW teljesítményt is leadtak) és termelékenységét (kb. 5–20-szorosára nőtt).

Az esztergagépek fejlődése különösen fontos szerepet játszott a gépgyártásban, hiszen ezek segítségével lehetett precíz tengelyeket, csavarokat és egyéb forgástest alakú alkatrészeket előállítani.

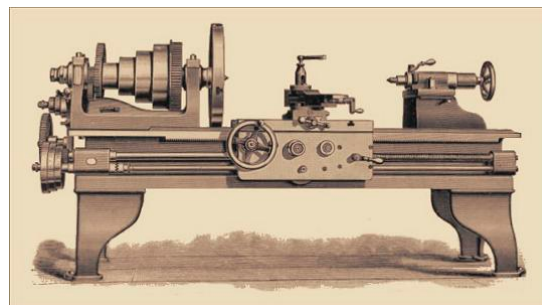


8. ábra. Szíjhajtásos műhely az ipari forradalom idején (1820–1850 közötti időszak) [4]

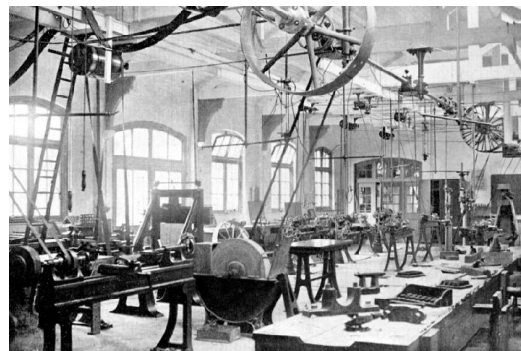
A gőzgép feltalálása után az esztergák meghajtására is főleg ezt gőzerőt használták a korábbi vízi és lábmeghajtás helyett [34, 35].

A gőzgép azonban nem egy esztergát hajtott meg, hanem az egy műhelyben lévő összes gép meghajtására egy darab gőzgépet használtak. Ezt transzmissziós hajtásnak nevezzük (8., 9. és 10. ábra) [34, 35].

A transzmissziós hajtást úgy oldották meg, hogy a mennyezeten végigfutó tengelyt, vagy tengelyeket hajtotta a gőzgép, majd a tengelyekről borszíjakkal vitték át forgó mozgást a gépekre (8., 9. és 10. ábra) [34, 35].



9. ábra. Eszterga transzmissziós hajtással (1850–1880 közötti időszak) (méretpontosság kb. $\pm 0,02$ – $0,1$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=1,6$ – $6,3$ μm) [4]



10. ábra. Korabeli gépgyár központi tengelyhajtással (1880–1910 közötti időszak) [5]

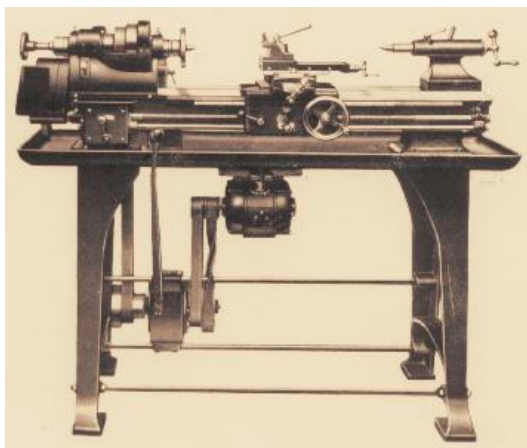


11. ábra. Öntöttvas gépágyas precíziós esztergagép (1860–1890 közötti időszak) (méretpontosság kb. $\pm 0,02$ – $0,05$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=1,6$ – $3,2$ μm) [6]

Az ipari fejlődés során az esztergagépek szerkezete is egyre korszerűbbé vált. Megjelentek a stabilabb

öntöttvas gépágyak (11. ábra), a pontosabb vezetékek és a különböző automatikus előtoló mechanizmusok. Ezek az újítások nemcsak a pontosságot javították, hanem a gyártási időt is csökkentették.

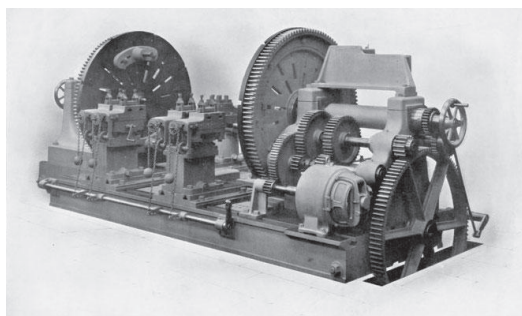
A villamos hajtású esztergagépek a 19. század végén, nagyjából az 1880-as–1890-es években jelentek meg. Elterjedésük szorosan kapcsolódott az elektromos motorok ipari alkalmazásának fejlődéséhez (12. ábra).



12. ábra. Esztergagép egyedi villamos meghajtással (1880–1890-es évek) (méretpontosság kb. $\pm 0,02$ – $0,05$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=1,6$ – $3,2$ μm) [7]

Az elektromos motor meghajtású esztergagépek megjelenése nagy előrelépést jelentett, mert:

- megszűnt a hosszú központi szíjhajtás szükségessége,
- pontosabb fordulatszám-szabályozás vált lehetővé,
- csökkent a zaj és az energia-vesztés,
- valamint biztonságosabbá és rugalmasabbá vált a gépek elhelyezése.



13. ábra. Elektromos meghajtású kerékeszterga (1906) (méretpontosság kb. $\pm 0,1$ – $0,3$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=3,2$ – 25 μm) [8]

Az esztergagépek fejlődése szorosan összekapcsolódott a vasút-, hajó- és fegyvergyártás növekedésével, mivel ezek az iparágak nagy mennyiségű, pontos alkatrészt igényeltek (13. ábra). A 13. ábrán látható gép fő feladata:

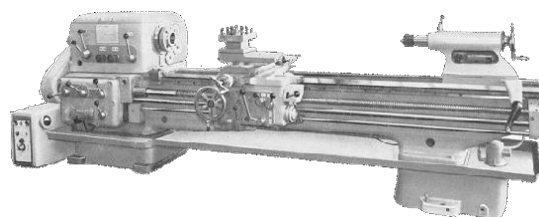
- vasúti kerekek futófelületének esztergálása,
- kopott, laposra futott („kockás”) kerekek javítása,
- új kerekek végső megmunkálása gyártás után,

- kerékperemek (karima) profilozása.

A vasúti biztonság miatt ez kritikus karbantartó gép volt.

4. A HAGYOMÁNYOS ESZTERGAGÉPEKTŐL AZ AUTOMATIZÁLÁSIG

A hagyományos esztergagépek működése teljes mértékben a gépkezelő szakértelmére épült. A munkadarab forgómozgását a gép biztosította, míg a szerszám előtolását és a megmunkálási folyamat irányítását az operátor végezte kézi vezérléssel. Ezek a gépek nagy gyakorlatot és precizitást igényeltek, mivel a méretpontosság és a felületi minőség nagymértékben a kezelő tapasztalatától függött.

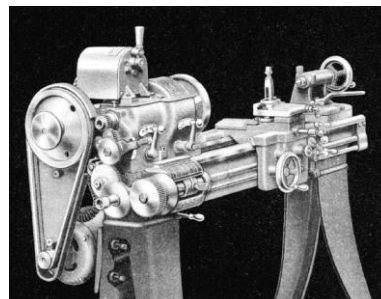


14. ábra. Esztergagép az 1940-es évekből (méretpontosság kb. $\pm 0,01$ – $0,03$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=0,8$ – 20 μm) [7]

Az esztergák korábbi, egyszerű és könnyű szerkezeti kialakításának módosítását az új szerszáanyagok – például a gyorsacél és a keményfém – megjelenése tette szükségessé, mivel az ezek alkalmazásával elérhető nagyobb forgácsolási teljesítmény fokozott terhelést jelentett, amelynek a korábbi gépszerkezetek már nem tudtak megfelelően ellenállni (1940-es évek: 1,5 – 3 kW, 1950–1960-as évek: 4 – 7,5 kW, 1970–1980-as évek: 7,5 – 11 kW) Erősebb és merevebb gépeket kellett építeni (14. ábra). Fő jellemzők:

- többségében mechanikus vezérlésű, kézi esztergagépek,
- egyedi villamos motoros hajtás már általános,
- fogaskerekes fordulatszámváltó az orsószekrényben,
- masszív, öntöttvas gépágy.

Ezek a gépek rendkívül tartósak voltak, sok ma is működik.



15. ábra. Amerikai LeBlond gyártmányú egyetemes esztergagép (1930-as évek) (méretpontosság kb. $\pm 0,02$ – $0,04$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=1,6$ – $12,5$ μm) [9]



16. ábra. egy klasszikus, ipari tömegtermelésre tervezett revolvereszterga (1940-es és 1950-es évek) (méretpontosság kb. $\pm 0,02-0,05$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=1,6-25$ μm) [10]

A 16. ábrán lévő revolveresztergagép igazi technikatörténeti jelentősége abban áll, hogy a hagyományos esztergák egyetlen késtartóját egy forgatható, több szerszámhelyes dobbal (a „revolverfejfel”) helyettesítette. Ez a mechanizmus lehetővé tette, hogy a munkás a szerszámok időigényes, kézi cseréje és újrapozicionálása nélkül, a fej egyszerű elforgatásával egymás után végezzen el fűrési, menetvágási vagy oldalazási műveleteket.

Az ipari termelés növekedésével egyre nagyobb igény jelent meg a gyorsabb, pontosabb és ismételhetőbb gyártási folyamatokra (15 és 16 ábrák).

Ennek hatására jelentek meg a félautomata (17. ábra), majd az automata esztergagépek (18. ábra), amelyek már bizonyos műveleteket emberi beavatkozás nélkül tudtak végrehajtani. Az automatizálás első lépései mechanikus vezérléssel történtek, például bütykös rendszerek alkalmazásával, amelyek előre meghatározott mozgásokat végeztek.



17. ábra. Egy klasszikus, robusztus egytemes eszterga (1960 - 1970-es évek) (méretpontosság kb. $\pm 0,02-0,04$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=0,8-25$ μm) [10]



18. ábra. Egy klasszikus, ipari kivitelű Brown & Sharpe márkájú automata esztergagép (1960 - 1970-es évek) (méretpontosság kb. $\pm 0,01-0,02$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=0,4-12,5$ μm) [11]

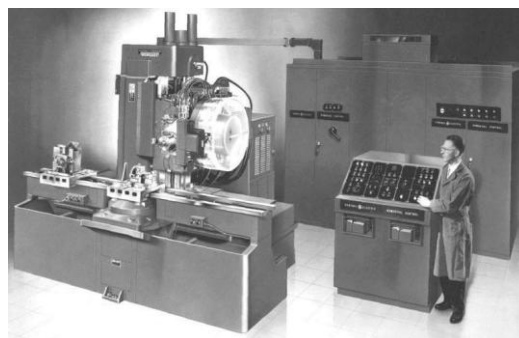
A félautomata esztergagépek esetén a gyártási ciklus bizonyos részeit a gép már teljesen önállóan, emberi beavatkozás nélkül végezte, de a ciklusok indításához még szükség volt az operátorra (17. ábra).

A kezdetleges automata esztergagépek a 19–20. század fordulóján jelentek meg, és az esztergálás első lépéseit jelentették az automatizálás felé. A kezdetleges automata esztergagépek ($P=4-7,5$ kW) mechanikus vezérlésű gépek voltak, amelyek előre beállított mozgásokkal ismétlődő alkatrészeket gyártottak emberi kézi vezérlés nélkül (18. ábra).

5. A CNC TECHNOLÓGIA MEGJELENÉSE ÉS FEJLŐDÉSE

A CNC-technológia megjelenése alapvető változást hozott az esztergagépek fejlődésében és a forgácsolóipar modernizációjában. A hagyományos, kézi vezérlésű esztergagépek hosszú időn keresztül meghatározó szerepet töltöttek be a gépgyártásban, azonban működtetésük nagy szakmai tapasztalatot igényelt, és a megmunkálás pontossága jelentős mértékben függött a kezelő szakértelmétől. A második világháborút követően egyre nagyobb igény mutatkozott a gyorsabb, pontosabb és automatizált gyártási technológiák iránt, különösen a repülőgépipar és hadiipar területén. Ennek hatására az 1950-es években megjelentek az első numerikus vezérlésű, úgynevezett NC (Numerical Control) gépek.

Az első numerikus vezérlésű esztergagépek még lyukszalagos programozással működtek, és elektromos vezérlőrendszer irányította a szerszám mozgását. Ezek a berendezések lehetővé tették az ismétlődő megmunkálási feladatok nagy pontosságú végrehajtását (ismétlési pontosság: $\pm 0,01-0,02$, felületi érdesség kb. $R_a=0,4-1,6$ μm), miközben jelentősen csökkentették az emberi hibák lehetőségét.



19. ábra. Az 1950-es évek elején fejlesztett korai numerikus vezérlésű (NC) szerszámgép (méretpontosság kb. $\pm 0,015-0,025$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=0,8-1,6$ μm) [12]

A 19. ábrán lévő szerszámgépet még vákuumcsöves elektronikával és lyukszalagos adatbevitellel működtették.

A technológia fejlődésével a számítógépek megjelenése új korszakot nyitott a gyártásban, így az 1970-es évektől fokozatosan elterjedtek a CNC

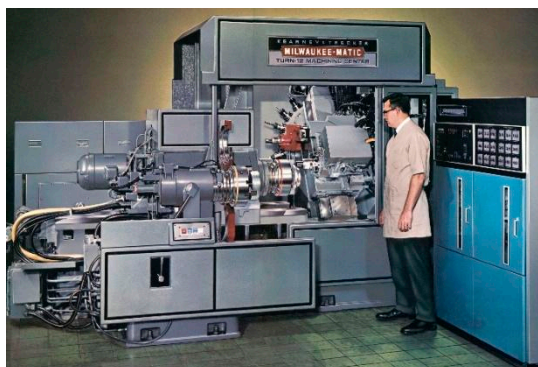
(Computer Numerical Control) esztergagépek (20. és 21. ábra). A CNC-rendszerek már digitális programok alapján működtek, ami gyorsabb programozást, nagyobb rugalmasságot és összetettebb alkatrészek gyártását tette lehetővé.



20. ábra. CNC eszterga az 1980-as évekből (méretpontosság kb. $\pm 0,01-0,02$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=0.8-12.5$ μm) [13]



21. ábra. 1990-es évekbeli CNC-esztergagép zárt burkolattal és digitális vezérlőpanellel (méretpontosság kb. $\pm 0,01-0,02$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=0.8-12.5$ μm) [13]



22. ábra. Egy korai Kearney & Trecker Corporation „Milwaukee-Matic” jellegű megmunkáló központ (méretpontosság kb. $\pm 0,015-0,02$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=1.6-12.5$ μm) [14]

A CNC-technológia elterjedése jelentősen növelte a termelékenységet, csökkentette az emberi hibák számát, és lehetővé tette az összetett alkatrészek gazdaságos gyártását is. A technológia fejlődése során a

hagyományos eszterga- és marógépeket fokozatosan felváltották a többtengelyes CNC-megmunkáló központok.

A 22. ábrán látható megmunkáló központ 1970-es években már számítógépes vezérléssel és részleges automatizálással működött. Ezek a gépek még nagy, robusztus öntöttvas szerkezettel készültek, és főként nagyipari feladatokra használták őket.

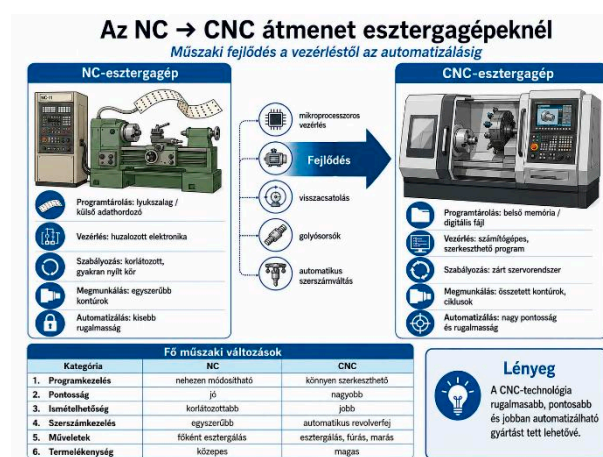


23. ábra. 5 tengelyes megmunkáló központ egyidejűleg (Kunzmann WF 650) (2009) (méretpontosság kb. $\pm 0,003-0,005$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=0.1-1.6$ μm) [15]

A 23. ábrán egy prémium kategóriás, német gyártmányú szerszámgép látható, amelyet kifejezetten precíziós alkatrészgyártásra, szerszámkészítésre, prototípusok készítésére és kis-közepes sorozatgyártásra terveztek.

6. NC-CNC ÁTMENET MŰSZAKI ELEMZÉSE ESZTERGAGÉPEK ESETÉN

Az NC-ről CNC-vezérlésre történő áttérés az esztergagépek jelentős műszaki fejlődését eredményezte (24. ábra).



24. ábra. NC – CNC átmenet esztergagépeknél

Az NC-gépeknél a programokat többnyire külső adathordozón tárolták, módosításuk pedig nehézkes volt,

míg a CNC-gépeknél a programok elektronikusan tárolhatók, szerkeszthetők és ismételten felhasználhatók.

A mikroprocesszoros vezérlés pontosabb tengelymozgást, fejlettebb interpolációt és összetettebb alkatrészek megmunkálását tette lehetővé.

A CNC-esztergákban elterjedtek a servomotorok, a helyzet-visszacsatolás, a golyósorsók és az automatikus szerszámváltók. Ezek javították a pozicionálási pontosságot, az ismételhetséget és a termelékenységet. Az újabb gépek már több műveletet, például esztergálást, fűrást és marást is képesek egyetlen befogásban elvégezni [24 - 27].

Összességében a CNC-technológia rugalmasabbá, pontosabbá és automatizáltabbá tette az esztergagépeket [24 - 27].

7. A MODERN ESZTERGAGÉPEK ÉS AZ IPAR 4.0 KAPCSOLATA

A modern esztergagépek fejlődése szorosan összefonódik az Ipar 4.0 koncepció megjelenésével, amely a gyártási rendszerek digitalizációját, hálózatba kapcsolását és intelligens működését helyezi előtérbe. A hagyományos CNC esztergagépek az elmúlt évtizedekben jelentős technológiai fejlődésen mentek keresztül: a kezdeti numerikus vezérlésű berendezésekből mára nagy pontosságú, szenzorokkal ellátott, számítógépes hálózatokhoz kapcsolható gyártóegységek váltak. Ez a fejlődés tette lehetővé, hogy az esztergagépek ne csak önállóan működjenek, hanem egy integrált, intelligens gyártási rendszer részei legyenek.

A 24. ábrán egy speciális hibrid technológiájú szerszámgép látható, amely egyesíti a nagyformátumú 3D nyomtatást (additív gyártás) és az 5-tengelyes CNC marást (szubtraktív megmunkálás) egyetlen munkatérben.



25. ábra. 5 tengelyes megmunkáló központ (Belotti FLU 2617) (2023) (pozicionálási pontosság kb. $\pm 0,015$ – $0,025$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=0.8$ – $1.6 \mu m$) [16]

Az Ipar 4.0 egyik legfontosabb eleme a „dolgok internete” (IoT), amely az esztergagépek esetében azt jelenti, hogy a gépek valós időben képesek adatokat gyűjteni és továbbítani saját működésükről. Ezek az

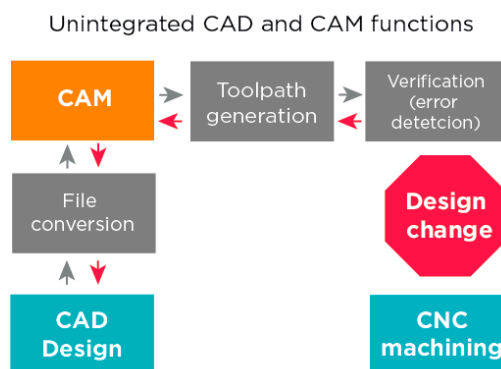
adatok magukban foglalhatják a forgácsolási paramétereket, a szerszámkopást, a hőmérsékletet vagy akár a rezgéseket is. A modern CNC esztergagépek így nem csupán végrehajtják a programozott feladatokat, hanem folyamatos visszajelzést adnak a gyártási folyamat állapotáról, ami lehetővé teszi a prediktív karbantartást és a hibák megelőzését (26. ábra).



26. ábra. Okos gyár CNC monitorral [17]

A digitalizáció másik kulcseleme a CAD/CAM rendszerek integrációja, amelyek révén a tervezés és a gyártás közvetlen kapcsolatba kerül egymással (27. ábra).

A CAD/CAM integráció az esztergagépek esetében összekapcsolja az alkatrész számítógépes tervezését a megmunkálási program előállításával. A CAD-rendszerben létrehozott geometriai modell alapján a CAM-szoftver meghatározza a szerszámpályákat, a fogásmélységet, az előtolást, a fordulatszámot és a megmunkálási sorrendet, majd posztprocesszor segítségével az adott CNC-vezérlés számára értelmezhető NC-programot készít. Ez jelentősen csökkenti a kézi programozási időt és a hibalehetőséget, különösen összetett kontúrok, menetek és többműveletes esztergálás esetén. A szimuláció és az ütközésvizsgálat révén a program még a tényleges gyártás előtt ellenőrizhető, ami növeli a biztonságot, a pontosságot és a gépkihasználatot (28. ábra).

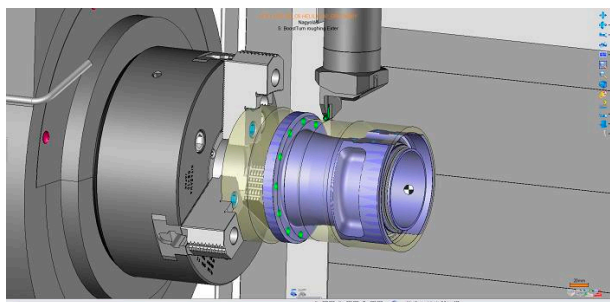


27. ábra. CAD – CAM rendszerek összefonódása [18]

Az Ipar 4.0 környezetben a modern esztergagépek gyakran mesterséges intelligenciával támogatott rendszerekkel is kiegészülnek. Ezek képesek

optimalizálni a forgácsolási paramétereket, felismerni a rendellenességeket, és automatikusan beavatkozni a gyártási folyamatba. Emellett a gépek gyakran robotokkal együttműködve működnek, például automatikus munkadarab-be- és kirakodás révén, ami tovább növeli az automatizáltság szintjét.

A mill-turn (vagy mill-turning) technológia olyan korszerű forgácsolási eljárás, amely egyesíti az esztergálás és a marás műveleteit egyetlen gépen, egyetlen felfogásban. A cél az, hogy a munkadarabot ne kelljen több gép között mozgatni, így pontosabb, gyorsabb és hatékonyabb gyártás érhető el (29. ábra).



28. ábra. CNC esztergálási folyamat szimulációja CAD/CAM környezetben [19]



a)

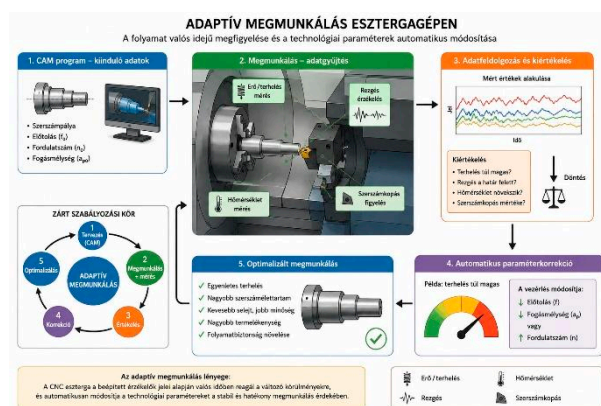


b)

29. ábra. Modern CNC esztergaközpont automatikus gyártási környezetben (pozícionálási pontosság kb. $\pm 0,004-0,006$ mm, felületi érdesség kb. $R_a=0.1-0.8 \mu\text{m}$) [20]

Az adaptív megmunkálás során [32, 33] a CNC-esztergagép érzékelők segítségével folyamatosan figyeli a forgácsolási folyamatot, például az orsóterhelést, a rezgést, a hőmérsékletet vagy a szerszámkopást (30. ábra).

A vezérlés ezek alapján valós időben módosíthatja az előtolást, a fordulatszámot vagy más technológiai paramétereket. Ez csökkenti a szerszámtörés és a selejt kockázatát, egyenletesebb minőséget biztosít, valamint növelheti a termelékenységet és a szerszám élettartamát.



30. ábra. Adaptív megmunkálás esztergagépen

8. MAGYAR ESZTERGAGÉPGYÁRTÁS SZEREPÉNEK ELEMZÉSE

A magyar esztergagépgyártás fontos alapot biztosított a hazai gépípar, a járműgyártás és a szerszámgyártás számára. A Magyarországon előállított hagyományos és később számjegyvezérlésű esztergagépek (31., 32 ábrák) lehetővé tették, hogy számos ipari vállalat belföldi gyártású termelőberendezéseket alkalmazzon.



31. ábra. SZIM E3N-01 – hagyományos, egyetemes esztergagép, a Szerszámgépipari Művek gyártmánya [28]

A szerszámgépgyártás hozzájárult a műszaki szakemberképzés fejlődéséhez, valamint a forgácsolási és gépgyártási ismeretek elterjedéséhez is.



32. ábra. NCT TB-20 YAMs CNC esztergagépközpont
Topper–NCT együttműködésének terméke [29]

A hazai gyártók (Csepel Szerszámgépgyár, Szerszámgépipari Művek, SZIM Esztergagépgyára, Fémáru- és Szerszámgépgyár, Csepeli Szerszámgépgyártó Rt., NCT Ipari Elektronikai Kft./NCT Zrt., stb.) termékei nemcsak a magyar üzemekben jelentek meg, hanem exporttermékként is szerepet kaptak, ezért az ágazat a külkereskedelem szempontjából is jelentős volt. Bár a rendszerváltást követően a magyar szerszámgépgyártás súlya csökkent, a korábbi gépek és műszaki megoldások ma is a magyar ipari örökség fontos részét képezik.

9. FEJLŐDÉSI TRENDEK KVANTITATÍV ELEMZÉSE

Az esztergagépek fejlődési trendjei kvantitatív módon a műszaki teljesítmény mérhető adatain keresztül vizsgálhatók. Az elmúlt évtizedekben jelentősen nőtt a gépek fordulatszáma, megmunkálási pontossága és termelékenysége, miközben csökkent a gyártási idő, a selejtarány és az egy munkadarabra jutó munkaerőigény. A hagyományos esztergákhoz képest a modern CNC-esztergák rövidebb idő alatt, nagyobb pontossággal és jobb ismételhetőséggel képesek alkatrészeket előállítani. A számszerű adatok alapján a fejlődés fő iránya az automatizálás, a hatékonyság növelése és a gyártási költségek csökkentése.

1. táblázat. A hagyományos és CNC-esztergagépek műszaki és termelékenységi mutatóinak összehasonlítása

Vizsgált mutató	Hagyományos esztergagép	Korai CNC-esztergagép	Modern CNC-esztergagép
Maximális fordulatszám	1 000–2 000 ford./perc	3 000–4 000 ford./perc	5 000–8 000 ford./perc
Megmunkálási pontosság	±0,10 mm	±0,02 mm	±0,005 mm
Egy alkatrész gyártási ideje	20 perc	10 perc	4 perc
Selejtarány	8%	3%	1%
Kezelői igény	1 fő/gép	1 fő/2 gép	1 fő/4 gép
Automatizáltság	Alacsony	Közepes	Magas
Programozhatóság	Nincs	Korlátozott	Fejlett
Termelékenység	Alacsony	Közepes	Magas

Az 1. táblázatban lévő értékek szemléltető jellegűek, mert a pontos adatok géptípusonként és gyártónként eltérhetnek [24 - 27].

Az 1. táblázat alapján az esztergagépek fejlődésével nőtt a fordulatszám, a pontosság és a termelékenység, miközben csökkent a gyártási idő, a selejtarány és a szükséges emberi munka [24 - 27].

Az esztergagépek műszaki adatainak validálása mérésekkel és szabványos próbákkal történt. A gyártók geometriai pontossági vizsgálatokkal ellenőrizték többek között a gépágy egyenességét, a főorsó futását, valamint a szánok mozgásának párhuzamosságát és merőlegességét. A gépek tényleges megmunkálási képességét próbadarabok esztergalásával igazolták, amelyeken megmérték a méretpontosságot, a hengerességet, a köralakhibát és a felületi érdességet.

Az NC- és CNC-gépek elterjedésével a vizsgálatok kiegészültek a tengelyek pozicionálási pontosságának, ismétléskéességének, a főorsó hibamozgásának és a gép hőstabilitásának mérésével. A validálás eredményeit a vonatkozó szabványokban meghatározott tűréshatárokkal vetették össze, és a gépet akkor tekintették megfelelőnek, ha valamennyi vizsgált jellemző a megengedett határértéken belül maradt [27, 30, 31].

10. ÖSSZEFOGLALÁS

Az esztergagépek fejlődése jól követi a gyártástechnológia ipari fejlődését a kézi vezérléstől a modern CNC rendszerekig. A kezdeti kézi esztergák alapvető forgácsolási műveleteket tettek lehetővé, azonban pontosságuk és hatékonyságuk nagymértékben függött a kezelő tapasztalatától.

Az ipari forradalom során megjelenő mechanikus és félautomata esztergák már nagyobb termelékenységet és jobb ismétlési pontosságot biztosítottak. A revolveres és automata gépek a sorozatgyártás igényeire reagálva tovább növelték a hatékonyságot és csökkentették a kézi beavatkozás szükségességét.

A CNC technológia megjelenése forradalmi változást hozott, mivel lehetővé tette a nagy pontosságú, összetett geometriájú alkatrészek gyors és ismételhető gyártását.

Napjainkban a CNC esztergák a digitalizált gyártórendszerek részeként működnek, gyakran automatizált és többtengelyes kivitelben.

11. SUMMARY

The development of lathes clearly reflects the industrial evolution of manufacturing technology, progressing from manual control to modern CNC systems. Early manually operated lathes enabled basic machining of rotational parts, but their accuracy and efficiency largely depended on the operator's skill and experience.

During the Industrial Revolution, mechanical and semi-automatic lathes emerged, offering higher productivity and improved repeatability. Turret and

automatic machines further increased efficiency by meeting the demands of mass production and reducing the need for manual intervention.

The introduction of CNC technology brought a revolutionary change, enabling the fast and repeatable production of complex geometries with high precision. Today, CNC lathes operate as part of digital manufacturing systems, often featuring multi-axis configurations and automated processes.

12. IRODALOM

- [1] <https://workingtheflame.com/machining-history/> [letöltve: 2026. 05. 19]
- [2] <https://uk.pinterest.com/pin/the-bow-lathe--632333603928971584/> [letöltve: 2026. 05. 19]
- [3] <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8415576/treadle-operated-ornamental-lathe> [letöltve: 2026. 05. 19]
- [4] https://szerszamgepgyartas.hu/hun/machines/eszterga_2.htm [letöltve: 2026. 05. 19]
- [5] <https://www.lathes.co.uk/southbend/page11.html>
- [6] <https://www.lathes.co.uk/barnes/> [letöltve: 2026. 05. 20]
- [7] https://szerszamgepgyartas.hu/hun/machines/eszterga_2.htm [letöltve: 2026. 05. 20]
- [8] https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ABeyer_Peacock_Electrically_Driven_Wheel_Lathe%2C_1906.jpg [letöltve: 2026. 05. 21]
- [9] https://www.lathes.co.uk/regal/page2.html?utm_source=chatgpt.com [letöltve: 2026. 08. 17]
- [10] <https://bullseyeindustrialsales.com/warner-swasey-3-a-m-1950-universal-saddle-type-turret-lathe-23-1-2-x-40-3ph-219756?srltid=AfmBOoqplr8FWVbHuINXdAmrhXn5yeS3R10nUzodhu7tFkvuNiy6HeYm> [letöltve: 2026. 05. 21]
- [11] <https://www.wotol.com/product/brown-sharpe-00-automatic-screw-machine/2455221> [letöltve: 2026. 08. 17]
- [12] https://www.construction-physics.com/p/what-happened-to-the-us-machine-tool?utm_source=chatgpt.com [letöltve: 2026. 05. 22]
- [13] https://www.machinesseeker.hu/Eszterga-ciklus-ellen-rzoett-darabol-s-tm-r-0-399-mm/ci-1614?utm_source=chatgpt.com [letöltve: 2026. 05. 22]
- [14] https://www.lathes.co.uk/kearney-and-trecker/page11.html?utm_source=chatgpt.com [letöltve: 2026. 05. 23]
- [15] <https://www.machinesseeker.hu/kunzmann-wf+650/i-21947068> [letöltve: 2026. 05. 23]
- [16] <https://www.machinesseeker.hu/belotti-flu+2617/i-21782573> [letöltve: 2026. 05. 24]
- [17] https://www.tmainnovation.com/t-connect?utm_source=chatgpt.com [letöltve: 2026. 05. 24]
- [18] <https://www.gsc-3d.com/blog/5-reasons-to-switch-to-integrated-cad-cam/> [letöltve: 2026. 05. 24]
- [19] <https://gepeszpresszo.hu/2021/11/02/11-modszer-a-szerszamelettartam-novelesehez/> [letöltve: 2026. 05. 24]
- [20] <https://www.wfl.at/en/machines/millturn/m30-m30-g-m35-m35-g> [letöltve: 2026. 05. 24]
- [21] CZÉH M., HERVAY P., NAGY P. S.: Megmunkálógépek, Műszaki Kiadó, Budapest, 2013, p. 170, ISBN 978-963-16-1659-0
- [22] FRIDRIK L.: Forgácsolás I. (Forgácsoláselmélet), Miskolci Egyetemi Kiadó, 2011, p. 205.
- [23] DUDÁS I.: Gépgyártástechnológia I. A gépgyártástechnológia alapjai. Műszaki Könyvkiadó, 2011., p. 583
- [24] KALPAKJIAN S., SCHMID S. R.: Manufacturing Engineering and Technology in SI Units. 8. kiadás. Pearson, 2022.
- [25] KIEF H. B., ROSCHI WAL H. A.: CNC Handbook. McGraw-Hill Education, 2012., p. 480.
- [26] GROOVER M. P.: Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. 5. kiadás. Pearson, 2019., p. 795.
- [27] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: ISO 230-1:2012. Test Code for Machine Tools. Part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating under No-load or Quasi-static Conditions. ISO, Geneva, 2012.
- [28] <https://iparihasznaltgepek.hu/termek/c3n-01-hagyomanyos-eszterga-2/> [letöltve: 2026. 08. 17]
- [29] https://glomach.com/listings/7292806-used-nct-tb-20-yams-i-cnc-turning-center?utm_source=chatgpt.com [letöltve: 2026. 08. 03]
- [30] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: ISO 230-2:2014. Test Code for Machine Tools. Part 2: Determination of Accuracy and Repeatability of Positioning of Numerically Controlled Axes. ISO, Geneva, 2014.
- [31] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: ISO 13041-6:2009. Test Conditions for Numerically Controlled Turning Machines and Turning Centres. Part 6: Accuracy of a Finished Test Piece. ISO, Geneva, 2009., p. 12.
- [32] MASORY O., KOREN Y.: Adaptive Control System for Turning. CIRP Annals, Vol. 29, No. 1, 1980., pp. 281–284. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61336-5.
- [33] KOREN Y., ULISOY A. G.: Adaptive Control. In: ASM Handbook. Vol. 16: Machining. ASM International, 1989., pp. 618–626. DOI: 10.31399/asm.hb.v16.a0002175.
- [34] KING S.: *History of the Lathe: Part Three – Mechanical Power*. Stuart King, 2008.
- [35] ROE J. W.: *English and American Tool Builders*. Yale University Press, New Haven, 1916., 315 p.

CONTENTS

1. Dr. Szilvia Gyöngyösi, Dr. Csilla Enikő Czégéni: FOCUS AREAS OF THE MATERIALS TESTING LABORATORY AT THE DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING OF THE UD	5	7. Máté File, Imre Kállai, Dr. Dávid Huri, Dr. Tamás Mankovits: MESO MODELLING OF POLYMER SANDWICH STRUCTURES	49
2. Dr. Sándor Bodzás, Dr. Gyöngyi Szanyi: INVESTIGATION OF THE GEOMETRICAL AND SHARPENING CHARACTERISTICS OF DISC MILLING CUTTERS BASED ON THE CONTROL CAM AND RELIEF GRINDING CURVES	13	8. Varga Tamás Antal, Dr. Fazekas Bálint, Dr. Tamás Mankovits: INTEGRATED DATA MANAGEMENT AND MATERIAL MODEL FITTING SYSTEM FOR MECHANICAL TESTING OF RUBBERS	53
3. Richárd Garay, Dániel Nemes: GEOMETRIC ACCURACY OF FDM PRINTING - FROM CAD MODEL TO REALITY	21	9. Gábor Ruzicska, Dr. Levente Czégé, Dr. Tamás Mankovits: SURROGATE MODEL-BASED OPTIMIZATION FOR THE DEVELOPMENT OF PRODUCTION SYSTEMS	58
4. Máté Técsi, Dániel Nemes: DETERMINATION OF EFFECTIVE MECHANICAL PROPERTIES FOR FDM STRUCTURES PRINTED WITH FIXED PARAMETERS	27	10. Dániel Nemes: MODELING METHODS IN MECHANICAL ENGINEERING	65
5. Richárd Garay, Dr. Sándor Manó, Dr. Tamás Mankovits: FATIGUE LIFE PREDICTION OF CELLULAR Ti6Al4V PLATE IMPLANTS USING EXPERIMENTAL AND NUMERICAL METHODS	33	11. Imola Lenke Csajbók, Dániel Nemes: MEASUREMENT OF TOYOTA AVENSIS VEHICLE PARAMETERS FOR VEHICLE DYNAMICS MODEL VALIDATION	72
6. Dr. Csilla Enikő Czégéni, György Hódos: APPLICATION OF AN ELECTRIC INJECTION MOLDING MACHINE IN UNIVERSITY EDUCATION OF BASIC ENGINEERING POLYMER TECHNOLOGY	43	12. Dr. Sándor Bodzás: THE DEVELOPMENT OF LATHE MACHINE TOOLS: FROM MANUAL OPERATION TO CNC TECHNOLOGY	77

GÉP

The technical, business, investment, sales, research and development, market information journal of
THE SCIENTIFIC ASSOCIATION FOR MECHANICAL ENGINEERING

President of Editorial Board:

Dr. Gabriella Vadászné Bognár

General Editor:

Dr. Csaba Dömötör

Deputy editors-in-chief:

József Vesza

Deputy:

Dr. György Ábrahám

Dr. István Barkóczy

Dr. Lajos Borbás

Dr. Árpád Czifra

Dr. József Danyi

Dr. Gusztáv Fekete

Dr. Péter Horák

Dr. Sándor Horváth

Dr. Béla Illés

Dr. Endre Jánosi

Dr. Károly Jármay

Dr. József Kakuk

Dr. Gábor Kalácska

Dr. Márk Lelkes

Dr. János Kanócz

Dr. László Könözy

Dr. Tamás Mankovits

Dr. Márton Máté

Dr. Ferenc Orbán

Dr. Gyula Patkó

Dr. Attila Piro

Dr. László Soltész

Dr. István Szabó

Dr. Szabolcs Szávai

Dr. János Száva

Dr. Ferenc Szigeti

Dr. Imre Timár

Dr. Zoltán Weltsch

DEAR COLLEAGUES!

It is my pleasure to welcome you to this special issue of GÉP, in which the Department of Mechanical Engineering at the Faculty of Engineering, University of Debrecen, presents 12 technical papers reflecting the key areas of its educational, research, and development activities. The papers cover materials science, manufacturing science, mechanics, machine design and engineering simulation, thus providing an insight into a broad spectrum of mechanical engineering disciplines.

This thematic diversity also reflects the extensive professional expertise and research capacity that have been developed within our department through consistent work over the past years. It is a particular pleasure and source of pride for us to have the opportunity to present our results in a dedicated special issue. We regard this opportunity not only as an honour, but also as important recognition of our joint efforts and continuous development. We consider it significant that through this special issue, mechanical engineering education and research at the Department of Mechanical Engineering can gain greater visibility within the wider professional community.

This special issue also provides an opportunity to express our gratitude to our lecturers, researchers, students, and our academic and industrial partners, as these results are built not only on individual achievements, but also on shared thinking, professional dialogue, and long-term cooperation.

We hope that this collection will not only provide an overview, but also stimulate new ideas, encourage further professional dialogue, and inspire new collaborations.

Every year, our department organizes the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, an event that has grown to become the most popular mechanical engineering conference in our country. We are also proud for our specialized engineering training programs (Simulation Engineer, Diagnostic Engineer, Polymer Engineer, Structural Integrity and NDT Engineer). Numerous industry professionals participate in these programs year after year. Our industrial services—particularly in the fields of materials testing and manufacturing technology—are also gaining increasing popularity.

We remain open to all professional initiatives and partnerships that contribute to the advancement of mechanical engineering and to strengthening cooperation between academia and industry.

Thank you for your kind attention, and I wish you an informative and rewarding read!

Tamás Mankovits PhD

head of department, associate professor

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering, University of Debrecen

Managing Editor: Dr. Csaba Dömötör • Editor's address: H-3515 Miskolc, Egyetemváros

Phone: +36-46/565-111 (12-90) • e-mail: mail@gepujsag.hu

Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Postal address: 1371, Bp, Pf. 433

Phone: +36-1/202-0656, Fax: +36-1/202-0252, E-mail: mail@gteportal.eu, Web: www.gteportal.eu

Web: <http://www.gepujsag.hu> • Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Publisher: Dr. Bárdos Krisztina, Managing Director

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Phone: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Distributed to subscribers by Magyar Posta Zrt, Postal address: 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered at any Hungarian post office, from postmen, from the link: www.posta.hu WEBSHOP

<https://www.posta.hu/ugyfelszolgalat/webform/hirlap>, via e-mail: hirlapelofizetes@posta.hu, by phone: +36-1/767-8262,

or mail to: MP Zrt. 1900 Budapest. Subscription: subscription can be ordered from overseas and to overseas at Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14. • T: +36 1 201 88 91, +36 1 212 53 03, E-mail: batthyany@kultur-press.hu

Domestic subscription prices are: HUF 1,260 a single copy and HUF 2,520 a double copy.

INDEX: 25 343 • ISSN 0016-8572 (Printed) • ISSN 3057-9473 (Online)

The published articles have been reviewed. • The publication is supported by the National Cultural Fund of Hungary

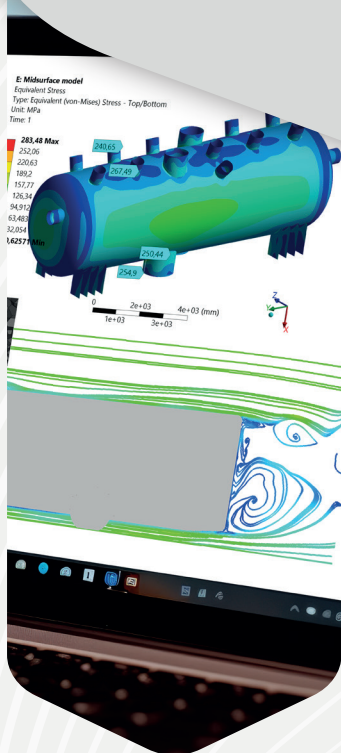
JEGYZET

JEGYZET



Debreceni Egyetem

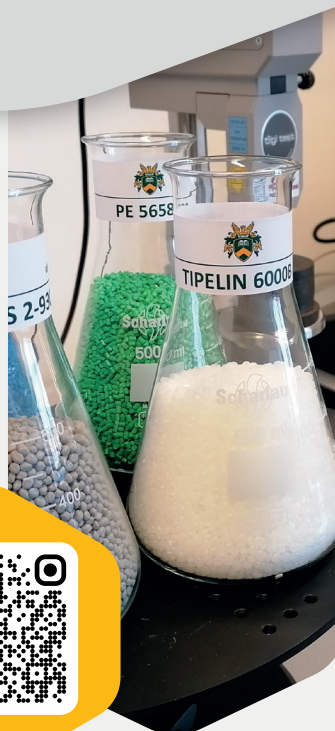
Műszaki Kar
Gépészmérnöki
Tanszék



**GÉPÉSZETI
SZIMULÁCIÓ**



**MŰSZAKI
DIAGNOSZTIKA**



**POLIMER-
TECHNOLÓGIA**



**SZERKEZETINTEGRITÁSI
ÉS RONCSOLÁSMENTES
VIZSGÁLÓ**

SZAKMÉRNÖK KÉPZŐMŰHELY

ÚJ TÁVVLATOK *a mérnök képzésben*

Fejlődés a szakma élvonalától.

*A Debreceni Egyetem Műszaki Karán elérhető 2 féléves,
levelezős rendszerű, gyakorlatorientált szakirányú továbbképzések,
ipari oktatókkal, korszerű laboratóriumi háttérrel.*

TOVÁBBI INFORMÁCIÓ

✉ gepeszmernok@eng.unideb.hu 🌐 mecheng.unideb.hu 📘 fb.com/gepeszmernokitanszek

📍 4028 Debrecen, Ótemető u. 2-4. III. emelet ☎ +36 52 415 155 / 77776



University of Debrecen

Department of
Mechanical Engineering

ISCAME

International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering

organized by the Department of Mechanical Engineering



Faculty of Engineering, University of Debrecen
Debrecen, Hungary

“

The main goal of **ISCAME** is to yearly bring together engineers, scientists, researchers, practitioners from academia and industry to present their original works and share experiences regarding all aspects of mechanical engineering sciences.



Conference website

TOPICS



Applied and
Theoretical
Mechanics



Artificial Intelligence in
Engineering Problems



Biomechanics



Energy
Industry



Engineering
Optimization



Fluid Mechanics



Industrial
Processes



Machine and
Product Design



Maintenance and
Condition Monitoring



Manufacturing
Science



Material Handling
and Logistics



Materials
Science



Mechanical Aspects
of Agricultural
Technologies



Polymer
Engineering



Structural
Integrity



iscame@eng.unideb.hu