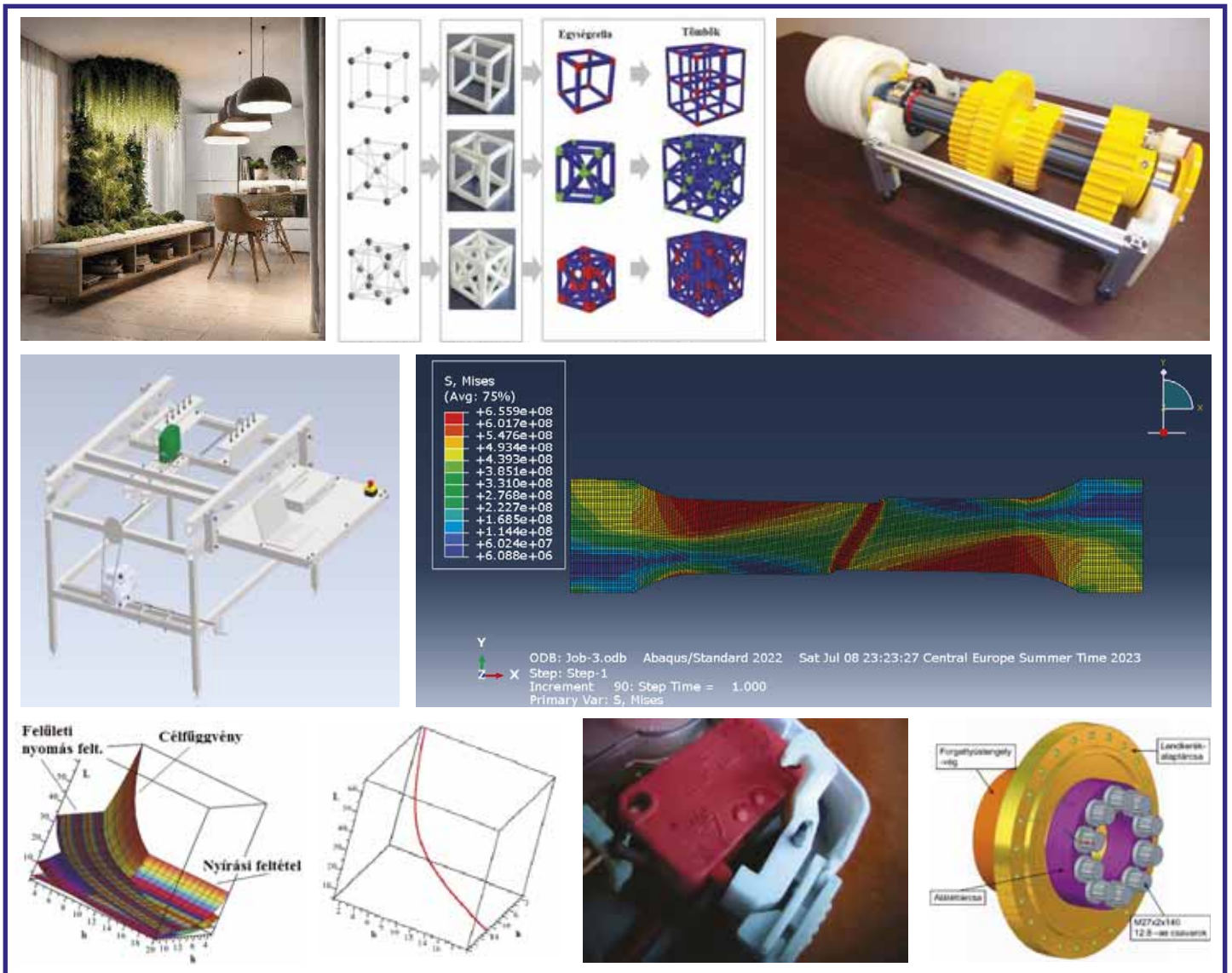


GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA



Géptervezők és Termékfejlesztők XXXIX. Szemináriuma

Miskolc, 2023. november 16 (csütörtök) – 17 (péntek)

– PROGRAM –

Időpont: 2023.11.16. csütörtök 10:00-12:15 (Plenáris ülés)

**Helyszín: MAB Székház, Miskolc, Erzsébet tér 3.,
Díszterem (I. emelet)**

Elnök: Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella

- 10:00 - 10:10 Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella egyetemi tanár ME Gép- és Terméktervezési Intézet: **MEGNYITÓ**
- 10:10 - 10:30 Fenyvesi Sándor tanársegéd, Prof. Dr. Orbán Ferenc professzor emeritus PTE Mérnöki és Smart Technológiák Intézet Gépészmérnöki Tanszék: **Az energiátárolás mechanikai technológiái**
- 10:35 - 10:55 Dr. Gotthard Viktor egyetemi adjunktus BME Gép- és Terméktervezés Tanszék: **A DFX technikák legújabb irányainak bemutatása**
- 11:00 - 11:20 Dr. Sarka Ferenc egyetemi docens ME Gép- és Terméktervezési Intézet: **A 3D lézer scannelés geometriai határainak kutatása**
- 11:25 - 11:45 Máday Attila ügyvezető MDA-Invent Kft: **Távcső tükrök gyártása CNC gépen**
- 11:50 - 12:10 Borbás Ferenc cégvezető Radius Signage Kft.: **Fenntartható termék és szolgáltatásfejlesztés a napelemes lefedéseknél. (Környezetvédelmi terméknylatkozat (EPD) szerinti terméktervezés és a felhasználók ESG fenntarthatóság fejlesztési lehetőségeinek javítása.)**
- 12:45 - 13:45 Ebéd és kávészünet a szeminárium regisztrált résztvevőinek

Időpont: 2023.11.16. csütörtök 14:00-17:00 (1. Szakmai szekció)

**Helyszín: MAB Székház, Miskolc, Erzsébet tér 3.,
Díszterem (I. emelet)**

Elnök: Dr. Dömötör Csaba

- 14:00 - 14:15 Dr. Ficzer Péter egyetemi docens, László Noémi PhD hallgató BME Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék: **A vasalási paraméterek hatásának vizsgálatához használt SEM felvételek elemzése CAD rendszer segítségével**
- 14:15 - 14:30 László Noémi SEM Laborvezető H-ION Kft, PhD hallgató, Dr. Ficzer Péter egyetemi docens BME Vasúti járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék: **A hidegplazmával végzett felületmódosítás lehetőségei additív technológiával gyártott járműipari alkalmazások esetén**
- 14:30 - 14:45 Dr. Váradi Károly egyetemi tanár, Döbrentei Sándor PhD hallgató BME Gép- és Terméktervezés Tanszék: **Végeselem környezetben definiált mozgó hőforrás analitikus validálása**
- 14:45 - 15:00 Dr. Jálics Károly egyetemi docens ME Gép- és Terméktervezési Intézet: **Lendítőkerék- rögzítő csavarok meghibásodásának elemzése**
- 15:00 - 15:15 Apáti Sándor PhD hallgató Swiss Krono Kft, Dr. Hegedűs György egyetemi docens ME Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet: **Szűrőfűrészkészítő próbapad tervezése**
- 15:15 - 15:30 Bányai Kristóf hallgató, Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella egyetemi tanár Miskolci Egyetem: **Ni-P és Ni-B bevonatok tribológiai tulajdonságainak vizsgálata**

Időpont: 2023.11.16. csütörtök 14:00-16:00 (2. Szakmai szekció)

**Helyszín: MAB Székház, Miskolc, Erzsébet tér 3.,
Deák terem (I. emelet)**

Elnök: Dr. Takács Ágnes

- 14:00 - 14:15 Domokos Tatiane PhD student, Dr. Baksa Attila associate professor, Dr. Szávai Szabolcs associate professor University of Miskolc: **Modelling of tensile test for simple flat specimen**
- 14:15 - 14:30 Borsodi Eszter PhD student, Dr. Takács Ágnes associate professor University of Miskolc Institute of Machine and Product Design: **Development of a design method for circular manufacturing**

- 14:30 - 14:45 Albert Judit PhD student, Dr. Takács Ágnes associate professor University of Miskolc Institute of Machine and Product Design: **Additive manufacturing with biomimetic approach**
- 14:45 - 15:00 Zainab Ali PhD student University of Miskolc Institute of Machine and Product Design: **Exploring the Influence of Surface Roughness on Vehicle Resistance and Its Performance**
- 15:00 - 15:15 Alzghoul Mohammad PhD student, Dr. Sarka Ferenc associate professor, Dr. Ferenc János Szabó associate professor University of Miskolc Institute of Machine and Product Design: **Optimizing Lathe Spindle System Chatter Resistance through Structural Modifications**
- 15:15 - 15:30 Alireza Aghakhani PhD student, Dr. Ágnes Takács associate professor University of Miskolc Institute of Machine and Product Design: **Biomimetic design thinking: integrating nature's strategies into the design process**
- 15:30 - 15:45 Cédric Laurent MSc student Institute of Polytechnic Science and Aeronautics, Toulouse, France: **Design methodology in the French architecture**

Időpont: 2023.11.17. péntek 9:00-12:30 (3. Szakmai szekció)

**Helyszín: MAB Székház, Miskolc, Erzsébet tér 3.,
Díszterem (I. emelet)**

Elnök: Dr. Szabó Ferenc János

- 9:00 - 9:15 Dr. Szabó Ferenc János egyetemi docens ME Gép- és Terméktervezési Intézet: **Párhuzamos oldalú bordáskötés grafo-analitikus optimalizálása**
- 9:15 - 9:30 Prof. Dr. Ecsedi István professor emeritus, Dr. Baksa Attila egyetemi docens, Habbachi Marwen PhD hallgató ME Műszaki Mechanikai Intézet: **Funkcionálisan gradiens anyagú bimodulusú téglalap keresztmetszetű görbe rúd hajlítása**
- 9:30 - 9:45 Dr. Bihari Zoltán egyetemi docens ME Gép- és Terméktervezési Intézet: **A műszaki kommunikáció múltja, jelene és jövője**
- 9:45 - 10:00 Dr. Szirbik Sándor egyetemi docens, Dr. Virág Zoltán egyetemi docens Miskolci Egyetem: **Rácsos hidváz rezgéseinek végeselemes vizsgálata terhelt állapotban**
- 10:00 - 10:15 Németh Géza adjunktus ME Gép- és Terméktervezési Intézet: **Zajszegény, mégis hatékony kertművelés felé**
- 10:15 - 10:30 Marada Imre PhD hallgató, Dr. Bihari János egyetemi docens ME Gép- és Terméktervezési Intézet: **A kisméretű műanyag fogaskerékpárok átforgatási nyomtékának vizsgálatára szolgáló berendezések összehasonlítása**
- 10:30 - 10:45 Csvila Péter PhD hallgató, Dr. Czigány Tibor egyetemi tanár BME Polimertechnika Tanszék: **Szén-alapú vezetőképes szerkezeti kompozitok gyártása és tulajdonságainak elemzése**
- 10:45 - 11:00 Besenyei István PhD hallgató, Dr. Bihari Zoltán egyetemi docens ME Gép- és Terméktervezési Intézet: **Gépépítő alumínium profil centrál furatának terhelhetősége**
- 11:00 - 11:15 Dr. Dömötör Csaba egyetemi docens ME Gép- és Terméktervezési Intézet: **Alkatrész rekonstrukciós megoldások tapasztalatai 3D nyomtatással**
- 11:15 - 11:30 Kulcsár Benedek MSc hallgató, Spisák Bernadett tanársegéd ME Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Erdei Réka tudományos munkatárs, Bézi Zoltán vezető kutató Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Nonprofit Kft.: **GTN paraméterek optimalizálása small punch vizsgálat és numerikus szimulációk felhasználásával**
- 11:30 - 11:45 Kriston József Balázs PhD hallgató ME Gép- és Terméktervezési Intézet: **Gépjármű meghibásodások vizsgálati lehetősége a Time Difference of Arrival (TDoA) módszerrel**
- 12:00 - 12:05 **ZÁRSZÓ**

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

műszaki, vállalkozási, befektetési, értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczöni Ádám

elnök

Vesza József

főszerkesztő

Dr. Jármái Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

főszerkesztő-helyettesek

Dr. Barkóczi István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálinkás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Szűcs Edit

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

TISZTELT OLVASÓ!

Jelen kiadvány, melyet kezében tart, a Géptervezők és Termékfejlesztők XXXIX. Szemináriumának szakmai előadásain ismertetett fejlesztő-kutató munkák anyagát foglalja össze írásos formában. A szerzők 29 előadással jelentkeztek a 2023. november 16-17-én rendezett konferenciára. Az előadások túlnyomó része, illetve néhány további publikáció, mindösszesen 30 db szakkikk jelenik itt meg nyomtatott formában. Köszönjük a szerzők és a lektorok munkáját.

Engedje meg a Tisztelt Olvasó, hogy röviden ismertessem a Géptervezők és Termékfejlesztők Országos Szemináriumának történetét. 1972 augusztusában a Gépipari Tudományos Egyesület Tégláson rendezett országos titkári értekezletén 110 vállalat és intézmény 234 delegáltja, többnyire konstrukciós tevékenységet folytató vezető beosztású szakembere foglalkozott az ipari konstrukciós munkával és annak szervezésével. A konstrukció tematikájú összejövetel megrendezését ekkor kezdeményezte prof. Dr. Terplán Zénó, prof. Dr. Magyar József és Dr. Száday Rezső főkonstruktőr.

Az első tanácskozást a Miskolci Egyetem Gépelemek Tanszéke munkatársainak részvételével 1973. augusztus 22-24-én rendeztük. A Tanácskozást Dr. Varga Jenő egyetemi tanár, a GANZ gyár főkonstruktőre nyitotta meg, kiemelve, hogy ilyen rendezvény hazánkban korábban nem volt. A Vezető Konstruktőrök Tanácskozása az 1975. évi rendezvényt követően 1977-ben Géptervezők Országos Szemináriumává alakult.

Az idei konferencián bemutatott kutatási-fejlesztési munkákból is jól látható, hogy a világ folyamatos változáson megy keresztül. Napjaink kiemelt témái közé tartoznak az energia kinyerése, tárolása és felhasználása köré csoportosuló fejlesztések vagy épp a 3D nyomtatott késztermékek gyártási lehetőségeinek kutatása. Ezzel párhuzamosan az új irányokat támogató hagyományos technológiák folyamatos fejlesztése egyaránt zajlik.

A szeminárium szervezői egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a pályakezdő és fiatal mérnökök, valamint BSc, MSc és PhD hallgatók megszólítására is. Fontos értéknek tartjuk, hogy a szerzők cikkei továbbra is megjelenhetnek hagyományos nyomtatott formában a GÉP folyóirat hasábjain, valamint a gepujsag.hu honlapon is a Gépipari Tudományos Egyesület és a Gazdász Kft. támogatásával. Köszönet érte.

*Dr. Dömötör Csaba
a Szeminárium titkára*

A szerkesztésért felelős: Vesza József. A szerkesztőség címe: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Telefon: +36-30/9-450-270 • 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://eshop.posta.hu/storefront/>), 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, Attília 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

A megjelent cikkek lektoráltak.

A kiadvány a Nemzeti Kulturális Alap támogatásával jelenik meg.

TARTALOM

1. <i>Aghakhani Alireza, Dr. Takács Ágnes:</i> BIOMIMETIKUS TERVEZŐI GÖNDOLKODÁS: TERMÉSZETI STRATÉGIÁK ALKALMAZÁSA A GÉPÉSZETI TERVEZÉS SORÁN	5
2. <i>Albert Judit, Dr. Takács Ágnes:</i> ADDITÍV GYÁRTÁS BIOMIMETIKAI MEGKÖZELÍTÉSSEL	9
3. <i>Apáti Sándor, Dr. Hegedűs György:</i> SZÜRŐFÜRÉS VIZSGÁLÓ PRÓBAPAD KONCEPCIONÁLIS TERVEZÉSE	13
4. <i>Angadi Basetappa Vishalakshi, Dr. Bencs Péter:</i> JOULE THOMSON EFFEKTVUS MEGOLDÁSA GÁZ- NYOMÁSSZABÁLYOZÓ ÁLLOMÁSOKNÁL	17
5. <i>Kolkar Nanjappa Sneha, Nagy Nóra, Dr. Bencs Péter:</i> HIDROGÉN KÉVEREDÉSE FÖLDGÁZZAL - KOCKÁZATÉRTÉKELÉS	21
6. <i>Beşenyey István, Dr. Bihari Zoltán:</i> GÉPÉPÍTŐ ALUMÍNIUM PROFIL CENTRÁL FURATÁNAK TERHELHETŐSÉGE	25
7. <i>Dr. Bihari Zoltán:</i> A MŰSZAKI KOMMUNIKÁCIÓ OKTATÁSÁNAK MŰLTJA, JELENE ÉS JÖVŐJE	29
8. <i>Borsodi Eszter, Dr. Takács Ágnes:</i> KÖRFORGÁSOS GYÁRTÁSHOZ IGAZODÓ TERVEZÉSI MÓDSZER FEJLESZTÉSE	33
9. <i>Csvila Péter, Dr. Czigány Tibor:</i> SZÉN-ALAPÚ VEZETŐKÉPES SZERKEZETI KOMPOZITOK GYÁRTÁSA ÉS TULAJDONSÁGAINAK ELEMZÉSE	39
10. <i>Bús Attila, Demeter Péter:</i> EGYEDI DIAGNOSZTIKAI ADAPTEREK FEJLESZTÉSE, KÜLÖNBÖZŐ AUTÓIPARI ALKALMAZÁSOKHOZ A TERMÉKFEJLESZTÉSI MÓDSZER ALAPELVEIN KERESZTÜL	45
11. <i>Domokos Tatiana, Dr. Szávai Szabolcs, Dr. Baksa Attila:</i> SÍKLEMEZ ALAKÚ PRÓBATEST SZAKÍTÓVIZSGÁLATÁNAK MODELLEZÉSE	49
12. <i>Döbrentei Sándor, Dr. Váradi Károly:</i> VÉGESELEM KÖRNYEZETBEN DEFINIÁLT MOZGÓ HŐFORRÁS ANALITIKUS VALIDÁLÁSA	53
13. <i>Dr. Dömötör Csaba:</i> ALKATRÉS Z REKONSTRUKCIÓS MEGOLDÁSOK TAPASZTALATAI 3D NYOMTATÁSSAL	57
14. <i>Drágár Zsuzsa, Dr. Kamondi László:</i> KAPCSOLÓMEZŐ AXIÁLIS MÉRETÉNEK MEGHATÁROZÁSA FERDE FOGÚ HENGERES KÜLSŐ FOGAZATÚ FOGAS-KERÉKPÁR KAPCSOLÓDÁSÁBAN	61
15. <i>Prof. Dr. Ecsedi István, Dr. Baksa Attila, Habbachi Marwen:</i> FUNKCIONÁLISAN GRADIENS ANYAGÚ BIMODULUSÚ TÉGLALAP KERESZTMETSZETŰ GÖRBE RÚD HAJLÍTÁSA	65
16. <i>Dr. Ficzer Péter, László Noémi:</i> A VASALÁSI PARAMÉTEREK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATÁHOZ HASZNÁLT SEM FELVÉTELEK ELEMZÉSE CAD RENDSZER SEGÍTSÉGÉVEL	69
17. <i>Sahm alden Abd al al, Fodorné Cserépi Mariann, Dr. Gáspár Marcell, Dr. Meilinger Ákos:</i> AUTÓIPARI NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK ÉS ALUMÍNIUM ÖTVÖZETEK ELLENÁLLÁS- PONTHEGESZTÉSE ÉS VEGYES KÖTÉSE	73
18. <i>Dr. Gotthard Viktor:</i> A DFX TECHNIKÁK LEGÚJABB IRÁNYELVEI	77
19. <i>Dr. Hegedűs György:</i> FORGÁCSOLÁS NAGYKINYÚLÁSÚ SZERSZÁMOKKAL	81
20. <i>Alzyod Hussein, Dr. Ficzer Péter, Dr. Borbás Lajos:</i> AZ FDM ELJÁRÁS GYÁRTÁSI FOLYAMAT PARAMÉTEREINEK, TERMIKUS ELEMZÉSE ÉS HATÁSA A MARADÓ FESZÜLTSEGEKRE	85
21. <i>Dr. Jálícs Károly:</i> LENDÍTŐKERÉK-RÖGZÍTŐ CSAVAROK MEGHIBÁSODÁSÁNAK ELEMZÉSE	89
22. <i>Dr. Keszi-Szeremlei Andrea, Dr. Nádásdi Ferenc:</i> IPARI TECHNOLÓGIÁK FEJLESZTÉSE AZ ÉRTÉKMÓDSZERTAN (VALUE METHODOLOGY) ALKALMAZÁSÁVAL	93
23. <i>László Noémi, Dr. Ficzer Péter:</i> A HIDEGLAZMÁVAL VÉGZETT FELÜLET- MÓDOSÍTÁS LEHETŐSÉGEI ADDITÍV TECHNOLÓGIÁVAL GYÁRTOTT JÁRMŰIPARI ALKALMAZÁSOK ESETÉN	97
24. <i>Kriston J. Balázs, Dr. Jálícs Károly:</i> GÉPJÁRMŰ MEGHIBÁSODÁSOK VIZSGÁLATI LEHETŐSÉGE A TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA) MÓDSZERREL	102
25. <i>Marada Imre, Dr. Bihari János:</i> A KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKERÉKPÁROK ÁTFORGATÁSI NYOMATÉKÁNAK VIZSGÁLATÁRA SZOLGÁLÓ BERENDEZÉSEK ÖSSZEHOSONLÍTÁSA	106
26. <i>Németh Géza:</i> ZAJSZEGÉNY, MÉGIS HATÉKONY KERTMŰVELÉS FELÉ	110
27. <i>Fenyvesi Sándor, Prof. Dr. Orbán Ferenc:</i> AZ ENERGIATÁROLÁS MECHANIKAI TECHNOLÓGIÁI	114
28. <i>Dr. Szabó Ferenc János:</i> PÁRHUZAMOS OLDALÚ BORDÁSKÖTÉS GRAFO-ANALITIKUS OPTIMÁLÁSA	118
29. <i>Dr. Szirbik Sándor, Dr. Virág Zoltán:</i> RÁCSOS HÍDVÁZ REZGÉSEINEK VÉGESELEMES VIZSGÁLATA TERHELT ÁLLAPOTBAN	122
30. <i>Borbás Ferenc:</i> FENNTARTHATÓ TERMÉK ÉS SZOLGÁLTATÁS FEJLESZTÉS A NAPELEMES LEFEDÉSEKNEL	126

BIOMIMETIC DESIGN THINKING: INTEGRATING NATURE'S STRATEGIES INTO THE DESIGN PROCESS

BIOMIMETIKUS TERVEZŐI GONDOLKODÁS: TERMÉSZETI STRATÉGIÁK ALKALMAZÁSA A GÉPÉSZETI TERVEZÉS SORÁN

*Alireza Aghakhani, PhD student, University of Miskolc, Institute of Machine and Product Design
Ágnes Takács, PhD, associate professor, University of Miskolc, Institute of Machine and Product Design*

ABSTRACT. Biomimicry is a design approach that looks to nature for solutions. This paper explores how designers can use nature's strategies at every stage of their work, from identifying problems to creating and testing solutions. By learning from nature, we can develop more innovative and sustainable designs. This research aims to provide clear guidance for designers on how to integrate Biomimicry into their processes. Real-life examples show how this approach can lead to more creative and eco-friendly design solutions.

1. INTRODUCTION

The concept of drawing inspiration from nature in design is known as Biomimicry or biomimetics. It involves emulating nature's patterns, strategies, and systems to solve human design challenges. Biomimicry, a term derived from "bio" (life) and "mimicry" (imitation), is a fascinating concept that involves drawing inspiration from nature's designs, processes, and systems to solve human challenges. This innovative approach recognizes that nature, through millions of years of evolution, has already developed efficient solutions to various problems. By exploring how nature has evolved to adapt and excel, engineers can unlock novel ideas that often surpass conventional human inventions. This paper delves into the significance of Biomimicry in mechanical engineering, shedding light on how nature's blueprints can guide us toward more ingenious and harmonious engineering solutions. In today's world, we face big challenges like scarce resources and environmental problems. To find creative and eco-friendly solutions, we can turn to nature. Biomimicry, a design approach inspired by nature, has become a valuable tool for designers. It means learning from the genius of nature's designs.

Biomimetic Design Thinking is about using these nature-inspired ideas at every step of the design process, from coming up with ideas to testing them out. Applying these principles, we can create smarter and more environmentally friendly designs. This research aims to show designers how to use Biomimicry in their work. We'll look at real examples to see how this approach can lead to better, more sustainable designs. [1]

2. BACKGROUND AND LITERATURE REVIEW

Throughout history, humans have found inspiration in the wonders of the Earth. Ancient tales, like that of Daedalus and Icarus, embody our fascination with nature. Daedalus, an ingenious inventor, fashioned wings of feathers and wax, mimicking birds, to escape an island's labyrinth. His son, Icarus, ignoring his father's advice, flew too close to the sun, a cautionary tale of nature's power.

In the background history of Biomimicry, we're tracing the path from ancient wisdom to modern innovation. In the past, people have instinctively taken ideas from nature to solve problems, like using caves for shelter or carving Buddhist temples into caves and mountainsides in India, which later served as trade posts on the Silk Road. These early examples, while not exactly what we now call "Biomimicry," demonstrate our innate ability to find inspiration in nature's solutions. The formal concept of Biomimicry, where we actively learn from nature's wisdom to tackle today's issues, is a more recent development. It marks a shift from passive observation to conscious adaptation, exemplified in the deliberate design of solutions based on principles derived from the natural world. The first Chinese umbrellas, invented around 300 years ago, emerged when Lu Ban observed

children using lotus leaves to shield themselves from the rain. Inspired by the flexibility and effectiveness of the lotus leaf, Lu Ban created the first umbrellas, often made of silk.

Going further back in history, the construction of the Egyptian pyramids around 2470 years ago has puzzled many. While there are numerous theories about who or what was responsible, one plausible theory is that the pyramids were designed to mimic the grandeur of mountains, showcasing an early example of nature-inspired architecture. The sheer magnitude and symmetry of the pyramids echo the majesty found in natural formations.

Around 2000 years ago, the Chinese learned silk-making from silkworms, showcasing our early forays into Biomimicry. In the Italian Renaissance, Leonardo da Vinci, who lived from 1452 to 1519, studied bird flight, sparking his flying machine designs. In 1912, Giacomo Ciamician envisioned a world without coal by unlocking photosynthesis's secret.

In the 1950s, the term "biomimetics" was coined by American biophysicist and inventor Otto Schmitt, signifying nature's influence. In 1997, Janine Benyus made a groundbreaking contribution to the field with her book, "Biomimicry: Innovation Inspired by Nature." She not only coined the term "Biomimicry" but also ignited widespread interest in the subject among engineers and designers worldwide.

In 1955, Swiss engineer George de Mestral invented Velcro, inspired by tiny hooks on bur surfaces. Japan's late 1990s application of Biomimicry redesigned noisy bullet trains using kingfisher beak-inspired fronts. [2]

The 2010s brought advancements. Engineers improved wind turbines, using fish school behaviour as a model, increasing efficiency. In 2012, gecko feet inspired adhesive substances for attaching objects to surfaces with ease. In 2014, sharkskin-inspired materials repelled bacteria, offering healthier environments. These examples illustrate how Biomimicry continues to connect us with nature, fostering innovation and sustainable solutions.

3. CASE STUDIES: THE CACTUS-INSPIRED BUILDING FACADE

Here in this section to understand better the idea of this research paper we provide specific examples of nature-inspired which can be integrated into each stage of the design process, from problem identification and ideation to prototyping and testing. [6]

In a world where energy efficiency and sustainable design are becoming increasingly crucial, innovative solutions that draw inspiration from nature have captured the imagination of architects and engineers alike. One such solution takes its cue from an unlikely source – the resilient and water-storing cactus. [3]

Problem Identification: imagine a scenario where a common problem faced is the overheating of buildings, leading to excessive air conditioning use, and a notable spike in energy consumption. This issue is particularly pertinent in areas with scorching climates, where the relentless sun beats down on structures, turning them into veritable ovens.

Idea Generation: the natural world is a treasure trove of ideas. Biomimicry enthusiasts, tasked with addressing this challenge, turned their attention to the cactus. These hardy desert dwellers have evolved over time to effectively manage temperature and conserve water. They store water and regulate their internal temperature through tiny openings on their skin.

Concept Development: this cactus-inspired approach was translated into a concept for a building facade. The idea was to create a facade that mimicked the cactus's water storage and cooling mechanisms to naturally cool the building, without relying heavily on energy-consuming air conditioning systems.

Design: in the design phase, the team specified materials and technologies to mimic the cactus's attributes. They chose superhydrophobic coatings to imitate the water-resistant quality of the cactus's skin. The facade was designed with modular panels that could capture and store rainwater, providing both an efficient cooling mechanism and shade to reduce heat gain.

Prototyping: with the design in hand, the team built a prototype of the cactus-inspired facade. This prototype incorporated superhydrophobic coating and a rainwater collection system.

Testing and Iteration: the next step was to test the facade's ability to cool the building. Data was collected on its effectiveness in reducing energy consumption compared to a traditional building facade. The design was tweaked based on the results of these tests.

Scaling and Production: once the prototype proved successful in cooling the building, it was time to scale up production. The cactus-inspired facade became a practical solution for buildings dealing with excessive heat gain.

Continuous Learning: the journey didn't end with production. Ongoing observation of the facade in real-world conditions allowed for further

adjustments and improvements, ensuring optimal performance and environmental benefits.

Documentation and Sharing: the findings and successes of this biomimetic design approach were shared with the architectural and construction community. The concept's potential to significantly reduce energy consumption and environmental impact was highlighted, encouraging others to adopt similar designs.

By emulating the cactus's natural cooling mechanism, this biomimetic approach not only addressed the initial problem of overheating but also harnessed nature's wisdom to create a more efficient and eco-friendly solution. This example illustrates how looking to the natural world for inspiration can lead to innovative, sustainable, and energy-saving designs in our built environment.

4. PRACTICAL GUIDELINES FOR DESIGNERS

Design Thinking and Biomimicry are two influential ideas that have become increasingly popular in the developing field of design. While biomimicry finds creative solutions by studying nature, Design Thinking takes a human-centred approach to problem-solving. By combining Design Thinking with Biomimicry, a new path for creativity, sustainability, and problem-solving can be explored. For designers wishing to include Biomimicry into their design processes work they can use a Biomimicry Design Lens (Figure 1) which is a specialized perspective that designers adopt when seeking inspiration from nature to solve human problems and create sustainable and efficient solutions. This lens emphasizes emulating and adapting natural forms, processes, and systems into human-made designs. According to the book "A Practical Guide to Bio-inspired Design" [4] the following practical guide can be offered for designer and readers.

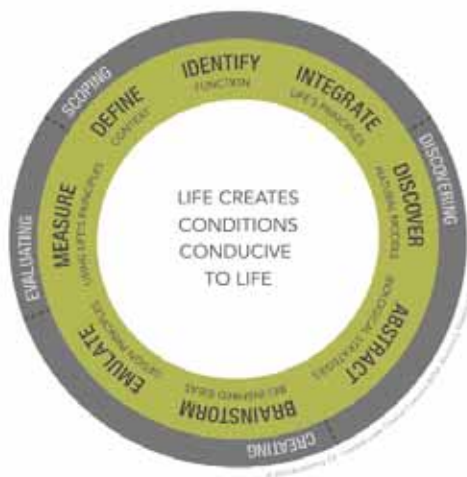


Figure 1. Biomimicry Design Lens

Retrieved from <https://biomimicry.net/the-buzz/resources/designlens-download-2/>.

1. step: Recognize the Basics of Biomimicry

Make sure you understand the fundamentals of Biomimicry well before attempting to incorporate them into Design Thinking. This entails valuing tried-and-true, long-lasting solutions from the natural world, viewing ecosystems as role models, and acknowledging nature as a mentor.

2. step: Start with Empathy and Observation

In the spirit of Design Thinking, begin with empathy. Observe and immerse yourself in the problem context, much like anthropologists' study cultures. However, extend this to nature itself – study ecosystems, organisms, and their

interactions. What can they teach you about the problem you're trying to solve?

3. step: Define the Problem

Clearly define your design problem such that it can be connected to a system or phenomenon found in nature. When building a transportation system, for instance, start by defining the problem by taking into account how ants effectively move around and communicate in a network.

4. step: Use Nature as Your Inspiration for Ideas

Allow the genius of nature to inspire you throughout the ideation stage. Consider how

your design issue might be approached by natural systems or organisms. Consider these sources of inspiration's structural, functional, and behavioural elements.

5. step: Models and Prototypes Inspired by Nature

When developing models or prototypes, actively include biomimetic components. Make use of natural materials, structures, and forms. When creating a sustainable packaging solution, for example, consider using biomimetic materials, which can biodegrade effectively in a manner similar to that of leaves in forests.

6. step: Test and Learn from Nature

Thoroughly test your design solution and contrast it with traditional solutions. Get information about user satisfaction, sustainability, and efficiency. Additionally, keep studying and taking notes from nature as you look for ways to improve and enhance your design.

It's important to remember that Biomimicry encourages collaboration between different fields, sustainability, and ethical design. Share your ideas to help connect Biomimicry with Design Thinking, creating new, eco-friendly solutions. Embrace these principles to support a design approach that values and learns from nature.

5. CHALLENGES AND ETHICAL CONSIDERATIONS

One of the core principles of Biomimicry is sustainability. We should ensure our design aligns with ethical and ecological considerations and avoid harmful practices and materials and strive for a harmonious relationship between our design and the environment. [5]

Biomimicry, which means learning from nature to design ideas, has its advantages, but it also comes with some difficulties:

Complexity: Nature can be very intricate, making it hard to figure out how to copy it in a design.

Limitations: Not all natural solutions can work for human problems, so there are limits to what we can use in our designs.

Intellectual Property: When we copy nature, there can be legal issues related to using these ideas in our designs.

6. CONCLUSION

Biomimicry is a fascinating way of designing things by taking cues from nature. It's better than traditional methods because it leads to more eco-friendly, efficient, and cost-effective solutions. Although there are challenges, the benefits are clear. Biomimicry has already inspired many cool designs and could help us find more sustainable solutions to environmental problems.

It's not just about products; Biomimicry can be used in architecture, transportation, and city planning too. For example, architects learn from termite mounds to make energy-efficient buildings, and transportation designers copy how birds fly to improve air traffic.

As Biomimicry becomes more popular, it could change how we create and innovate. Nature is a great teacher, and we can all learn from it. Following nature's lead can make the world more sustainable and beautiful for us and the future.

7. REFERENCES

- [1] Hwang, J.; Jeong, Y.; Park, J. M.; Lee, K. H.; Hong, J. W.; Choi, J. (2015). Biomimetics: forecasting the future of science, engineering, and medicine. *International Journal of Nanomedicine*, 10, pp.: 5701–5713. DOI: 10.2147/IJN.S83642
- [2] Emily B. K (2017) Biomimicry: Design by Analogy to Biology, *Research-Technology Management*, 60:6, 51-56, DOI: 10.1080/08956308.2017.1373052
- [3] Ding, W.; Li, H. (2022, October) Fiber of bioinspired columnar cactus prickly-like structure for reinforced SiC aerogel: Thermal insulation and mechanical properties, *Volume 42, Issue 13*, pp: 5438-5447, DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.06.068
- [4] Farzaneh, H. H.; Lindemann, U. (2009). *A Practical Guide to Bio-inspired Design*, ISBN 978-3662576830, Springer Vieweg.
- [5] Stevens, L. ; Kopnina, H. ; Mulder, K.; de Vries, M. (2020). Biomimicry design thinking education: a base-line exercise in preconceptions of biological analogies. *International Journal of Technology and Design Education*, 31(4), pp.: 797–814. DOI: 10.1007/s10798-020-09574-1
- [6] Dömötör, Cs.: Forma és funkció kapcsolatai a természetben, *GÉP* 68: 3 pp.44-47, 4 p. (2017)

ADDITÍV GYÁRTÁS BIOMIMETIKAI MEGKÖZELÍTÉSSEL

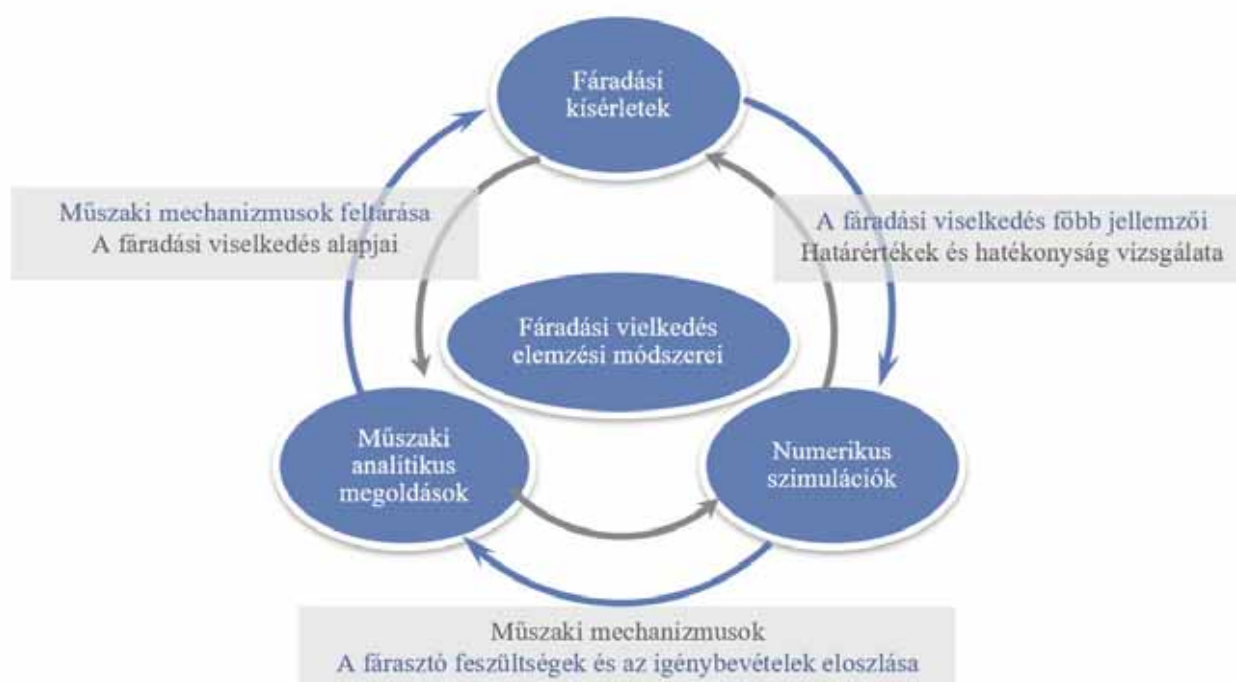
ADDITIVE MANUFACTURING WITH BIOMIMETIC APPROACH

Albert Judit, PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet
Dr. Takács Ágnes, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

ABSTRACT As a result of millions of years of development, nature has created structures that are resistant to the various effects of the environment. However, due to their complexity, these structures found in nature are very difficult to produce with the tools of traditional manufacturing technology. Thanks to the development of additive manufacturing, difficult structures can now be produced relatively easily. Lattice structure constructions with excellent mechanical characteristics can be made using topological optimization techniques, according to the model of additive manufacturing design. By combining these two methods, lightweight and high-strength structural alternatives can be developed.

1. BEVEZETÉS

Az additív gyártási (AM) technikák közelmúltbeli fejlődése lehetővé teszi, olyan összetett felépítésű alkatrészek gyártását, amelyek hagyományos gyártási módszerekkel nem gyárthatók. Az additív gyártás napjainkban, amikor a fenntarthatóság egyre nagyobb jelentőséget kap, olyan előnyökkel is jár, mint az alkatrész gyártásának rövidülése, az energiafogyasztás csökkentése és az anyaggazdálkodás minimalizálása [1-4]. Ez a módszer új perspektívát kínál azoknak a tervezőknek és mérnököknek, akik az additív gyártást munkájuk során használják.



1. ábra. A fáradási viselkedés elemzési módszerei [5]

A tanulmányban bemutatásra kerül a rácsszerkezetek és a topológiai optimalizálás [20] relevanciája biomimetikus megközelítésben, illetve említésre kerül a rácsszerkezetek optimalizálása,

továbbá ezen módszerek és a biomimetika kapcsolata. A fásztási vizsgálatok fontosak a fáradási viselkedés vizsgálatára, de csak fenomenológiailag képesek leírni a topológia fáradási

tulajdonságainak összefüggéseit. Mivel a szerkezeten belüli feszültségeloszlást nem lehet közvetlenül a fárasztási kísérletekkel meghatározni, ezenkívül a fárasztási kísérletek elvégzése idő- és munkaiigényes, ha nagyszámú mintadarabot használunk; így a hatékonysága nem elég nagy. [5] A fent említett korlátozások miatt a fárasztási kísérleteket más technológiákkal együtt kell alkalmazni a fáradási viselkedés átfogó megértéséhez.

A legtöbb hagyományos gyártási módszer nem tudja biztosítani azt a tervezési szabadságot, mint az AM, melynek köszönhetően a tervezés során elméleti megfontolásokat, analitikus megoldásokat és számítási modelleket használunk az úgynevezett "tervezési-tulajdonsági" összefüggések megállapítására, amelyek segítségével megjósolható, hogy milyen topológiai kialakításra van szükség ahhoz, hogy a kívánt tulajdonságok egy adott kombinációja megvalósuljon. [6][7] Ez gyakran olyan összetett topológiai kialakításokat eredményez, amelyek csak fejlett AM-technikákkal valósíthatók meg.

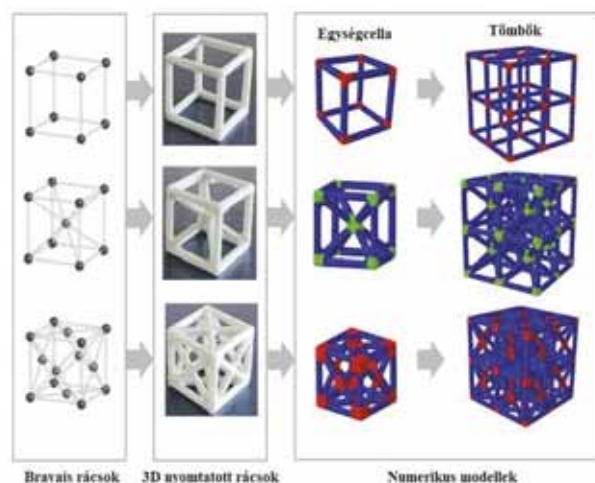
2. RÁCSSZERKEZETEK

Az additív gyártási technikák fejlődése felszabadította a rácsszerkezetek tervezését azáltal, hogy lehetővé tette a rácsszerkezetek gyárthatóságát [8]. A rácsszerkezetek struktúrák elsősorban csomópontokból és merevítő elemekből épülnek fel, amelyek jelentősen hozzájárulnak a tömeg csökkentéséhez és egyben a szerkezeti integritás fenntartásához [9][10].

2.1. A rácsszerkezetek mechanikai tulajdonságai

Mivel a rácsszerkezetek tulajdonságai közvetlenül függenek az egységcella alakjától és

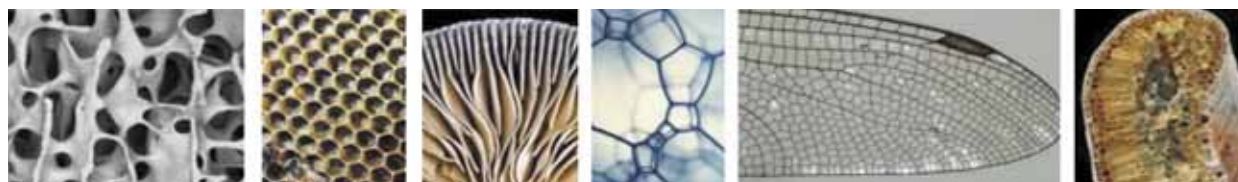
szerkezetétől, minden egyes egységcella különböző mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik [11].



2. ábra. A rácsszerkezetek és az egységcellák felépítésének példái [11]

2.2. A rácsszerkezetek előnyei és hátrányai

Hagyományosan a rácsszerkezetek öntéssel, lemezalakítással készülhetnek, azonban e módszerek gyártási korlátai nagy mértékben befolyásolják a tervezett rácsszerkezetek összetettségét. Ezért ezekkel a módszerekkel csak néhány egyszerű egységcellás topológiájú rácsszerkezet állítható elő, ellentétben az AM lehetőségeivel. A tervező számára a legfontosabb kihívás egy konstrukciós alkalmazásban a megfelelő változók kiválasztása. A rács anyaga, a cella típusa és a térfogatarány fontos szerepet játszik a szerkezeti merevség és szilárdság meghatározásában. Ugyanez vonatkozik más mechanikai tulajdonságokra is. Mivel a méret befolyásolja a mechanikai teljesítményt a rácsszerkezetek mechanikai jellemzőit, minél kisebb a relatív sűrűség, annál nagyobb a mérethatás is [12].



3. ábra. A természetben megtalálható rácsszerkezetek példái: a) emberi csont SEM alatt, b) méhsejtes szerkezet, c) gomba micella, d) Voronoi-struktúra buborékokban, e) szitakötő szárnya, f) levél-metszeti szerkezete [13]

2.3. A rácsszerkezetek gyárthatósága

Az additív gyártási technikák fejlesztése, mint például a 3D nyomtatás, lehetővé tette az összetettebb szerkezetek létrehozását a

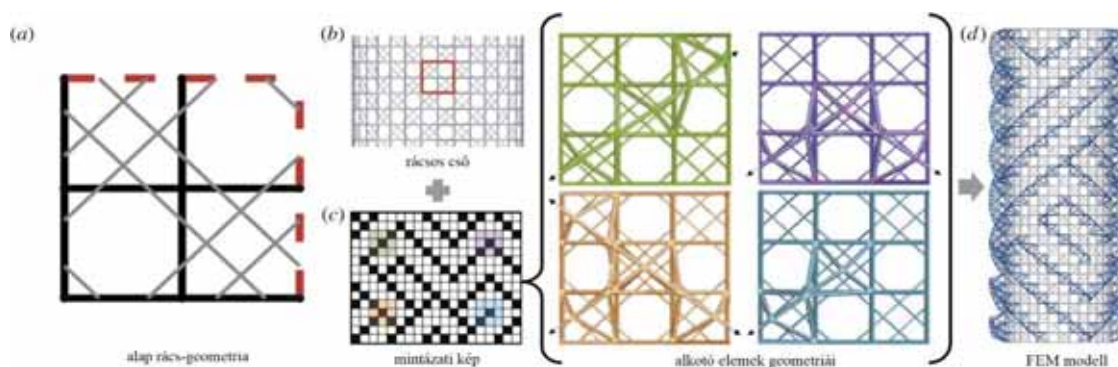
rácsszerkezetek tervezésekor. Így, az AM-módszerekkel létrehozott rácsok utánozhatják a bioanyagokat, mint például a csont [14]. Míg a 2D extrudált szövetszerű rácsok hagyományos

gyártási módszerekkel, például öntés, kovacsolás és extrudálás révén állíthatók elő, a 3D héj/lemezserű szerkezetek az AM-módszerrerel állíthatók elő, mivel általa akár összetett szerkezeti struktúrák is gyárthatóvá válnak [15].

3. BIOMIMIKRI

A természet optimalizálta összetett szerkezetek biológiai struktúráiból merített ötletek, a legújabb fejlesztéseknek köszönhetően széles körben elterjedtek az additív gyártás területén. Ezek a természetben gyakran előforduló struktúrák inspirációs forrást jelentenek a különféle a

mérnöki alkalmazásokban alkalmazható sejt-szerkezetek kialakításához [16][19]. A természetes szerkezetek gyakran több ismétlődő szerkezeti elem komplex rendszerei. Ezek a biológiai szerkezetek szálas, helikális, gradiens, réteges, csőszerű, celluláris, varratos és átfedő struktúrákként sorolhatók fel, amint az a 3. ábrán látható. A természet számos hatékony megoldást kínál, a természetben található kovaszivacs vázak, a diatómák és a tengeri szivacsok [17], nagyon nagy szilárdságot mutatnak, amely a pórusos könnyűszerkezet és különböző geometriai struktúrák hierarchikus elrendeződéséből adódik.



4. ábra. A kovaszivacs szerkezeti modellek létrehozásának munkafolyamata: (a) átlósan megerősített négyzetes egységcellás geometria vázlatrajz, a (b) ábrán látható csőszerű rács létrehozásához, majd (c) a teljes váz-modell megalkotásához használt különböző elemeket alkotó sémák feltérképezése, végül a (d) FEM modell mintázatának modellezése [17]

A természetben található összetett struktúrák meghaladják a hagyományos tervezési és gyártási technológiákat, akadályozva a biomimetikai tanulmányok előrehaladását és mérnöki alkalmazásokban való felhasználását. Az AM új lehetőségeket teremtett a több anyagból készült multifunkcionális szerkezetek előállítására, és a biomimikri integrációja lehetővé teszi az áttöréseket a mérnöki technológia fejlesztésében a következő évtizedekben [18].

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A természetszintézis mechanizmusait tovább kell tanulmányozni a felhasználható bioinspirált struktúrák tervezéséhez a mérnöki rendszerekben. Ennek érdekében az AM gyártást más technológiákkal együtt fejleszteni kell, hogy feltárhatóak legyenek a gyártott alkatrészek tulajdonságai mögött meghúzódó mechanizmusok és a természetben megfigyelhető jelenségek. Fontos továbbá megérteni az anyagot formáló növekedési folyamatokat a természetben, és azonosítani őket, ami inspirálhatja a helyettesítő módszerek megtalálását a természetes növekedés

folyamatának utánzására, egy rövidebb időskálán. Ily módon a 3D nyomtatás tudja legjobban megközelíteni a növekedési folyamatot és egyben megfelelni a gyártási időskálának mérnöki környezetben. A kutatás ezeknek az anyagoknak és szerkezeteknek a megértésével további betekintést nyújthat ezeknek a természetes szerkezeteknek a replikálására szolgáló módszerekbe ahelyett, hogy egyszerűen ismételnék a biológiai struktúrákat.

5. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] W. Tao, M. C. Leu: Design of lattice structure for additive manufacturing, International Symposium on Flexible Automation (ISFA), 2016, pp. 325-332, doi: 10.1109/ISFA.2016.7790182
- [2] P. Datta, V. Vyas, S. Dhara, A. R. Chowdhury, A. Barui: Anisotropy properties of tissues: a basis for fabrication of biomimetic anisotropic scaffolds for tissue engineering, J. Bionic Eng. 16, 842-868 (2019), doi:10.1007/s42235-019-0101-9

- [3] J. Plocher, A. Panesar: Review on design and structural optimization in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures, *Materials & Design*, 183, 2019.
doi: 10.1177/0954405420949209
- [4] V. N. Hoang, P. Tran, V. T. Vu, H. Nguyen-Xuan: Design of lattice structures with direct multiscale topology optimization, *Composite Structures*, 252, 2020.
doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112718
- [5] H. Huang, L. Wang, Y. Fan: Metallic metamaterials: A critical review of fatigue behaviors, *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, Volume 8, Issue 3, September 2023, 100585.
doi: 10.1016/j.jsamd.2023.100585
- [6] Alzyod Hussein, Ficzer Peter: Material-Dependent Effect of Common Printing Parameters on Residual Stress and Warpage Deformation in 3D Printing: A Comprehensive Finite Element Analysis Study, *POLYMERS* 15:13, p. 2893, 2023.
- [7] Alzyod Hussein, Borbas Lajos, Ficzer Peter: Rapid prediction and optimization of the impact of printing parameters on the residual stress of FDM-ABS parts using L27 orthogonal array design and FEA, *MATERIALS TODAY: PROCEEDINGS*, 2023.
- [8] A. D. Voicu, A. Hadăr, D. Vlăsceanu: Benefits of 3D printing technologies for aerospace lattice structures, *Scientific Bulletin, Mircea cel Batran, Naval Academy*, 24(1), 8-16, 2021.
- [9] L. J. Gibson, M. F. Ashby: *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [10] A. Seharing, A. H. Azman, S. Abdullah: A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts, *Advances in Mechanical Engineering*, SAGE Publications Inc., 12(6), pp. 1–21, 2020.
doi:10.1177/1687814020916951
- [11] F. Libonati, S. Graziosi, F. Ballo, M. Mognato, G. Sala: 3D-Printed Architected Materials Inspired by Cubic Bravais Lattices, *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 9 (7), pp.: 3935–3944, 2023. 10. 16
doi: 10.1021/acsbomaterials.0c01708
- [12] N. Kladovasilakis, K. Tsongas, D. Tzetzis: Finite Element Analysis of Orthopedic Hip Implant with Functionally Graded Bioinspired Lattice Structures, *Biomimetics* (Basel, Switzerland), 5(3), 44, 2020.
doi:10.3390/biomimetics5030044
- [13] A. Nazir, K. M. Abate, A. Kumar, J. Y. Jeng: A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9–12), pp.:3489–3510, 2019.
doi:10.1007/s00170-019-04085-3
- [14] G. Briguier, P. F. Egan: Structure, Process, and Material Influences for 3D Printed Lattices Designed With Mixed Unit Cells. *Proceedings of the ASME 2020 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Volume 11A: 46th Design Automation Conference (DAC), 2020.
doi: 10.1115/DETC2020-22575
- [15] D. S. Nguyen: Design of lattice structure for additive manufacturing in CAD environment. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 13(3), 2019.
doi:10.1299/jamdsm.2019jamdsm0057
- [16] A. du Plessis, C. V. Broeckhoven, I. Yadroitseva, I. Yadroitsev, C. H. Hands, R. Kunju, D. Bhate: Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27, 408-427, 2019.
doi:10.1016/j.addma.2019.03.033
- [17] M. C. Fernandes, M. Saadat, P. Cauchy-Dubois, C. Inamura, T. Sirota, G. Milliron, H. Haj-Hariri, K. Bertoldi, J. C. Weaver: Mechanical and hydrodynamic analyses of helical strake-like ridges in a glass sponge, *Journal of the Royal Society, Interface*, 18(182), 2021.
doi:10.1098/rsif.2021.0559
- [18] Y. Yang, X. Song, X. Li, Z. Chen, C. Zhou, Q. Zhou, Y. Chen: Recent Progress in Biomimetic Additive Manufacturing Technology: Materials to Functional Structures, *Article in Advanced Materials*, 2018.
doi:10.1002/adma.201706539
- [19] Dömötör Csaba, Péter József: Természeti elvek az analógia alapú tervezésben, *GÉP* 63: 12 pp. 29-32., (2012)
- [20] Szabó Kristóf: Investigation of the Applicability of Topological Methods, *LECTURE NOTES IN MECHANICAL ENGINEERING, Vehicle and Automotive Engineering*, pp. 582-591., (2022)

SZÚRÓFŰRÉSZ VIZSGÁLÓ PRÓBAPAD KONCEPCIONÁLIS TERVEZÉSE

CONCEPTUAL DESIGN OF JIG SAW TEST BENCH

Apáti Sándor, PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet
Hegedűs György, PhD, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet

ABSTRACT

In this paper the conceptual design of a jigsaw test bench is presented. The testing equipment is suitable for testing sawing of soft and hard bulk materials. The jigsaw is powered by a battery, which drives a DC motor. The rotational motion is converted into linear motion through a Scotch Yoke mechanism. With the help of this test bench, the voltage drop and current consumption of the battery is measured during the sawing process, from which it can be determined how the cutting force occurring during sawing affects the performance provided by the battery.

1. BEVEZETÉS

A megmunkálási és gyártási folyamatokban a kéziszerszámok kulcsfontosságúak. A szúrófűrész egy elterjedt hordozható elektromos kéziszerszám, amellyel hatékonyan lehet fűrészelni puha anyagokat, egyenes vagy ívelt furatokat. A szúrófűrészekkel a fán kívül acélt, üvegszálat, alumíniumot és egyéb anyagokat is tudunk vágni, így rendkívül hasznos eszközök a műhelyben. Mehta és Patel a szúrófűrészgépek azon képességét vizsgálta, hogy különböző vastagságú fa és fémet fűrészelve a gépek milyen kinematikai és szilárdsági jellemzőket produkáltak. A tervezés során döntő fontosságú a mechanizmus elemzése a motor forgásával kapcsolatban, mivel a nyomaték, az aktív és kényszer erők, valamint a gyorsulás a forgó hajtókar szöghelyzetétől függően változnak, ami viszont megváltoztatja a tehetetlenségi erőket, illetve a feszültségeloszlást a mechanizmusban. A tanulmány eredményei megmutatták a maximális von Mises feszültségértékeket a bemeneti teljesítményigényt, amelyeket összevetnek a szúrófűrészgép

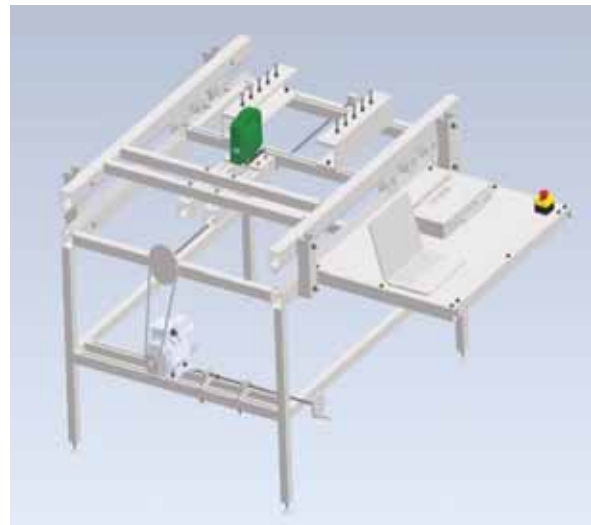
anyagminőségével, illetve specifikációival, és ezek alapján értékelték a gép teljesítményét [1]. Kutatást végeztek az anyagleválasztás vizsgálatára az alternáló mozgással megvalósított fűrészelés során a vágás modellezésére és a fűrészlap tervezésének javítására tett kísérlet részeként. Egy kísérleti vágószerszám eredményei azt mutatták, hogy a lineáris vágási sebesség mind a kétirányú sebességgel, mind a tolóerővel nő, miközben az eredmények arra utalnak, hogy a tolóerő hasznosabb lehet a vágás optimalizálásában. Ezenkívül felfedezték, hogy a fűrészlap nem tud ferde vágást létrehozni és dinamikus tolóerőt okoz, amely felváltva a felhasználó ellen és a felhasználó számára hat. A kutatások szerint az anyagleválasztás nagy része a vágási löket során történik, amikor a forgács körülbelül kétharmada keletkezik [2]. Az oda-vissza fűrészelési folyamatot Domblesky és társai vizsgálták a lineáris vágási sebesség modelljével együtt. A végső modell figyelembe veszi a rugalmas és képlékeny bemélyedéseket, és vágás ortogonális közelítésén alapul az egyes fűrészfogakon. A figyelembe vett változók sokféleségét tekintve a műszeres fűrészberendezéssel elért vágási sebességek jó egyezést mutatnak a tervezett eredményekkel. Felfedezték, hogy a vágási sebesség fordítottan arányos a tolóerővel és az oda-vissza mozgási sebességgel, bár magasabb szinten, az élsugár és a forgácsoláskor keletkező feszültség befolyásolja ezt a viselkedést. A fogosztás és a lapát konfiguráció befolyását nem lehetett elkülöníteni; azonban megállapították, hogy a durvább fogosztású pengék valóban gyorsabban vágnak [3]. A szúrófűrész vizsgálatánál fontos a fűrészelés irányának meghatározása. A vizsgálandó fűrész típus esetén a gép úgynevezett pengebillentő egységgel

rendelkezik, amely lehetővé teszi, hogy a fűrészlap csak egy irányban vágjon. A vágási irány meghatározása után fontos a vágási anyag kiválasztása, a fa alapanyagot feltételezzük általában. A jó fűrész alapkövetelménye, miszerint az acélból készült fűrészlap kiváló minőségű. Krómmal és vanádiummal ötvözött elektro- vagy öntött acélból készült fűrészlapok, amelyek szívóssága és rugalmassága, valamint éltartó képessége egyaránt kedvező. Ezenkívül ezekkel a fűrészlapokkal nagy teljesítmény érhető el alacsony energiabevitel mellett. A kézi szerszámok rezgéscsökkentésének igénye fontos, így ennek a követelménynek a teljesítéséhez a csillapító kialakítást figyelembe veszik. A rezgésterhelés és a csillapítás vizsgálata a szűrőfűrész mérési eredményeinek elemzése segítségével határozható meg. Az elektromos szerszámok használata során a kézben vagy testben keletkező rezgéseknek való kitettség fontos szempont. A csillapító eszközök alkalmazása a kézi szerszámokban elterjedt a vibráció csökkentésére [4], [5]. Az akkumulátoros szűrőfűrész kísérleti és elméleti vizsgálatának célja elsősorban annak meghatározása, hogy a forgácsolóerő hogyan befolyásolja az akkumulátor töltöttségét. Melyek azok a paraméterek, amelyek megváltoztatásával több vágási ciklus érhető el egy adott akkumulátor töltöttségi szinten. Az akkumulátor paraméterein kívül ismerni kell a fűrész motorjához kapcsolódó mechanikai alkatrészek fizikai jellemzőit, pl. tehetetlenségi nyomatékok. Az akkumulátoros szűrőfűrész kísérleti és elméleti vizsgálatának célja elsősorban annak meghatározása, hogy a forgácsolóerő hogyan befolyásolja az akkumulátor töltöttségét. Melyek azok a paraméterek, amelyek megváltoztatásával több vágási ciklus érhető el egy adott akkumulátor töltöttségi szinten. Az elméleti elektromechanikai modell megalkotása és vizsgálata mellett a vágási műveletek jellemzőinek mérésére egy vizsgálópád koncepcionális tervezésére is sor került, melyet a következő fejezetben mutatunk be.

2. A VIZSGÁLÓPAD FELÉPÍTÉSE

A bevezetésben áttekintett tanulmányok alapján látható, hogy a fűrészek vágóerő vizsgálata a gépek tervezése szempontjából kiemelkedően

fontos feladat. Az általunk tervezett kísérleti vizsgálópád az 1. ábrán látható.



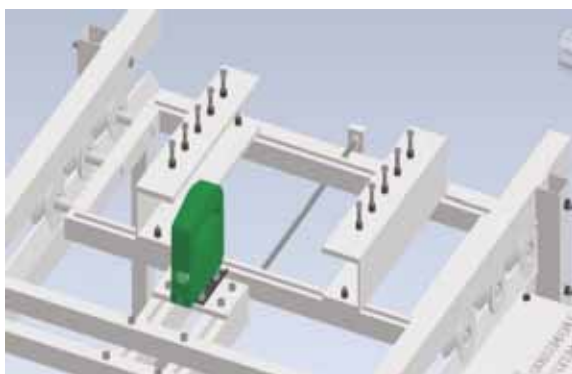
1. ábra. Szűrőfűrész vizsgáló próbapád.

A próbapádot egy 1,5 kW teljesítményű villanymotorral és hozzátartozó frekvenciaváltóval terveztük, amely az előtolást biztosítja a vizsgáló berendezésen. Ennek segítségével az előtolás nagyságát lehet beállítani, amelyet egy szíjhatás és egy menetes orsó biztosít a szerkezeten.



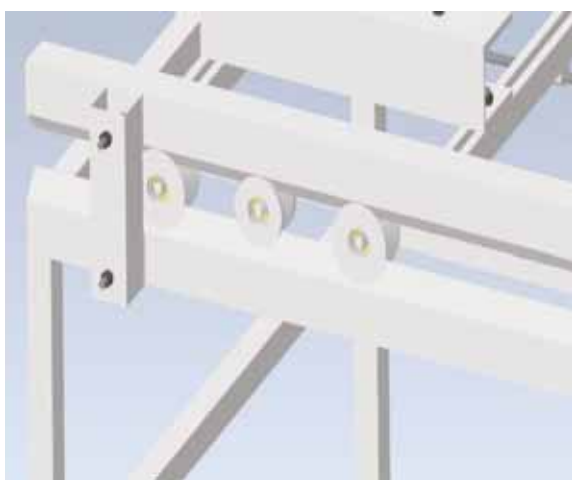
2. ábra. Előtoló szerkezet.

A 2. ábrán látható az előtolást biztosító szerkezet elrendezési vázlata. Az előtoló szerkezet egy munkaszállt mozgató, amelyen megtalálhatóak a munkadarab befogók. A munkadarabot befogó alkatrészek 500 mm hosszúak és 800 mm hosszán tud a munkaszállal együtt mozogni. A következő 3. ábrán látható a munkadarabot befogó alkatrészek és a munkaszáll. A munkaszáll egy alapkerethez 6 darab profilgörgővel csatlakozik.



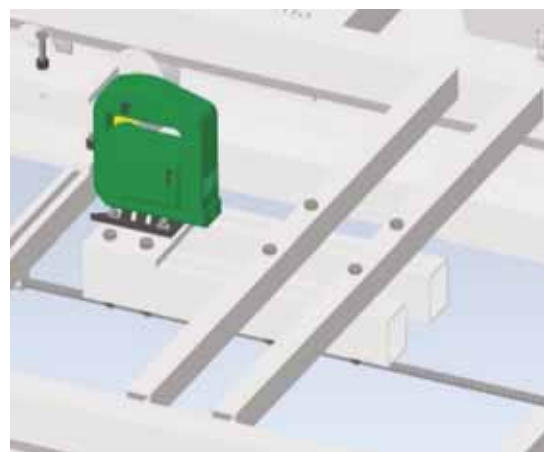
3. ábra. Munkasztal és befogók.

Ezen görgőkön keresztül tud a munkasztal mozogni. A görgők elhelyezkedését a 4. ábra mutatja.



4. ábra. Görgős megvezetés.

A profilgörgők az alapkereten és a felsőkereten egy-egy zártszelvényen futnak. A két szélső görgő az alsó kereten, a középső pedig a felső kereten támaszkodik fel annak érdekében, hogy a munkasztal mozgás és vágás közben ne tudjon elbillenni. A profilgörgők kettő darab mélyhornyú egysoros golyóscsapágyakkal vannak szerelve. Az alsó és a felső alapkeret az előző ábrán látható módon össze van kötve négy darab zártszelvényvel, melyeket csavarkötéssel rögzítünk egymáshoz. A tervezés során figyelembe vettük, hogy amennyiben változtatni akarjuk a munkasztal hosszanti méretét, akkor a felső keret leszerelésével ez a művelet könnyedén megvalósítható. A szögacél sín a keretekhez hegesztett kötéssel kapcsolódik. A fűrészgép felfogatása az 5. ábrán látható. A 3. ábrán látható, hogy a dekopírfűrész a hosszanti felfogató gerendákon állítható.



5. ábra. A dekopírfűrész felfogatása.

A tervezéskor a pozicionálás fontossága elengedhetetlen kérdés volt, mivel több típusú szűrőfűrész is tesztvizsgálatoknak vetünk alá. Ahhoz, hogy a méréseket kompaktul el lehessen végezni a tesztpadra került egy kiegészítő rész, amin a mérőműszerek és adatgyűjtők elhelyezhetők. A 6. ábrán látható a mérőpad mérési adatgyűjtő kiegészítő része.



6. ábra. Mérési adatgyűjtő kiegészítő rész.

A vizsgáló pad a biztonsági követelményeknek megfelelően tartalmaz egy vészgombot is, amely azonnal megállítja a kísérleti folyamatot, amennyiben azt működtetjük.

3. A MÉRÉS FELÉPÍTÉSE

A próbapad üzemelésekor a mérések regisztrálását és a mérési adatgyűjtést egy *Smart Energy meter, single-phase* mérési adatgyűjtő rendszer biztosítja. A méréskor az akkumulátor kapcsain eső feszültséget és a mérő kábelben átfolyó áramerősséget mérjük. A rendszer valós idejű diagnosztikát végez, amelyet regisztrál.



7. ábra. Smart Energy meter, single-phase mérési adatgyűjtő rendszer [6].

A mérőrendszer egy százalék hibapontossággal mér. A készüléket az elektromos hálózati paraméterek és a villamosenergia-fogyasztás folyamatos mérésére tervezték. A készülék a következő paramétereket méri:

- feszültség: V,
- áramerősség: A,
- hasznos teljesítmény: W,
- visszatáplált teljesítmény: rW,
- elektromos energia: Wh,
- fordított aktív energia: rWh,
- teljesítménytényező,
- hőmérséklet: °C / °F.

A készülék szabályozott száraz érintkező kimenettel van felszerelve. A szabályozott kimenet a terhelésvezérlés automatizálására szolgál.



8. ábra. A Smart Energy meter grafikus felhasználói felülete [6].

A kimenet vezérelheti a szilárdtest relék teljesítményét, amelyekhez elektromos készülékek csatlakoznak, vagy az épületautomatizáláshoz gyengeáramú hálózatokban. A 8. ábrán látható a mérőrendszer

grafikus felhasználói felülete. Az adatok tárolására egy felhő alapú webes alkalmazás áll rendelkezésre, amely a méréshez biztosít különböző widgeteket, indikátorokat, illetve diagramokat.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben bemutatásra került egy mérésre alkalmas szűrőfűrészes vizsgáló próbapad koncepcionális tervezése. A próbapad alkalmas több típusú szűrőfűrészes azon belül dekopírfűrészes vizsgálatára. A *Smart Energy meter, single-phase* érőrendszer sokoldalú használatával mérhető és regisztrálható az akkumulátor kapcsain eső feszültség és a mérőkábelen átfolyó áramerősség a vágási művelet közben. Ezek után meghatározható, hogy bizonyos terhelés mellett hogyan hat a vágóerő az akkumulátor teljesítményére.

5. IRODALOM

- [1] V. Mehta and V. Patel, "Performance Evaluation of Jigsaw Machine with Kinematic and Stress Analysis," in *Proceedings of ICTACEM 2017 International Conference on Theoretical, Applied, Computational and Experimental Mechanics*, 2017, ICTACEM-2017/0655.
- [2] J. Domblesky, G. E. O. Widera, and T. P. James, "Experimental investigation of reciprocating sawing," *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME*, vol. 34, pp. 531–538, 2006.
- [3] J. P. Domblesky, T. L. James, and G. E. O. Widera, "A Cutting Rate Model for Reciprocating Sawing," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 130, no. 5, Sep. 2008, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2976143>.
- [4] A. A. Koli and M. M. Tayde, "Design and Analysis of Jigsaw and Damper for Effect of Vibration Reduction in Hand Held Power Tool," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 5, no. 7, pp. 65–73, 2015.
- [5] N. B. Patil and J. J. Salunke, "Design and Analysis of Viscous Damper for Vibration Reduction in Hand Operated Power Tools," *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 514–524, 2016.
- [6] <https://smart-maic.com/hu/>

JOULE THOMSON EFFEKTUS MEGOLDÁSA GÁZNYOMÁS SZABÁLYOZÓ ÁLLOMÁSOKNÁL

SOLUTION OF JOULE THOMSON EFFECT FOR GAS PRESSURE REGULATOR STATIONS

Angadi Basettappa Vishalakshi*, Bencs Péter**

ABSTRACT

In this research, a mathematical overview of the industrial treatment of the Joule Thomson effect is presented. The solutions will be used to solve industrial problems. The problem is mainly related to heating solutions for pressure reducing stations. Here, we will apply the mathematical relationships given to calculate the cooling of pressure reducing valves. By applying these relations, numerical simulation is performed to properly map the operation.

1. BEVEZETÉS

Joule-Thomson-effektus, más néven Joule-Kelvin-effektus, a gáz expanziójával járó hőmérsékletváltozás, amely nem jár munkával vagy hőátadással. Közöséges hőmérsékleten és nyomáson a hidrogén és a hélium kivételével minden valódi gáz lehül ilyen expanzió esetén; ezt a jelenséget gyakran használják ki a gázok cseppfolyósításánál. A jelenséget 1852-ben James Prescott Joule és William Thomson (Lord Kelvin) brit fizikusok vizsgálták. A lehülés azért következik be, mert munkát kell végezni a gázmolekulák közötti nagy hatótávolságú vonzás leküzdéséhez, amikor a molekulák egymástól távolodnak. A hidrogén és a hélium csak akkor hűl le expanzió esetén, ha a kiindulási hőmérsékletük nagyon alacsony, mert ezekben a gázokban a nagy hatótávolságú erők szokatlanul gyengék [1].

A termodinamikában a Joule-Thomson-effektus (más néven Joule-Kelvin-hatás vagy Kelvin-Joule-effektus) egy valós gáz vagy folyadék hőmérsékletváltozását írja le (megkülönböztetve az ideális gáztól), amikor azt egy szelepen vagy porózus dugón keresztül kényszerítjük, miközben szigetelve tartjuk, hogy ne történjen hőcsere a környezettel. Ezt az eljárást fojtási folyamatnak vagy Joule-Thomson-folyamatnak nevezik. Szobahőmérsékleten a hidrogén, a hélium és a neon kivételével minden gáz lehül a Joule-Thomson-folyamat által okozott expanziókor, amikor egy nyíláson keresztül fojtják; ez a három gáz hasonlóan viselkedik, de csak alacsonyabb hőmérsékleten. A legtöbb folyadékot, például a hidraulikus olajokat a Joule-Thomson-féle fojtási folyamat felmelegíti.

A gázhűtéses fojtási folyamatot általában a hűtési folyamatokban, például a levegő szétválasztására szolgáló ipari folyamatok cseppfolyósítóiban használják ki. A hidraulikában a Joule-Thomson-féle fojtásból származó

melegítő hatás felhasználható a belsőleg szivárgó szelepek felkutatására, mivel ezek hőt termelnek, ami termoelemmel vagy hőkamerával kimutatható. A fojtás alapvetően irreverzibilis folyamat. A tápvezetékek, hőcserélők, regenerátorok és a (hő)gépek egyéb alkatrészeinek áramlási ellenállásából eredő fojtás a teljesítményüket korlátozó veszteségek forrása.

A hatás James Prescott Joule és William Thomson, után kapta nevét, akik 1852-ben felfedezték. Joule korábbi, a Joule-expanzióval kapcsolatos munkája nyomán jött létre, amely szerint egy gáz vákuumban szabad expanzió megy keresztül, és a hőmérséklet nem változik, ha a gáz ideális.

Egy gáz adiabatikus (hőcsere nélküli) expanziója többféleképpen is végrehajtható. Az expanzió során a gáz által tapasztalt hőmérsékletváltozás nemcsak a kezdeti és a végső nyomástól, hanem az expanzió végrehajtásának módjától is függ.

- Amennyiben az expanziós folyamat reverzibilis, azaz a gáz mindenkor termodinamikai egyensúlyban van, akkor izentróp expanzióról beszélünk. Ebben az esetben a gáz az expanzió során pozitív munkát végez, és hőmérséklete csökken.

- Szabad expanzió esetén viszont a gáz nem végez munkát és nem vesz fel hőt, így a belső energia megmarad. Ilyen módon expandáltatva egy ideális gáz hőmérséklete állandó maradna, de egy valódi gáz hőmérséklete csökken, kivéve nagyon magas hőmérsékleten [2].

- Ebben a cikkben tárgyalt expanziós módszert, amely során a P_1 nyomáson lévő gáz vagy folyadék a kinetikus energia jelentős változása nélkül áramlik egy alacsonyabb P_2 nyomáson lévő területre, Joule-Thomson-expanzióknak nevezzük. Az expanzió eredendően irreverzibilis. Az expanzió során az entalpia változatlan marad (lásd a bizonyítást alább). A szabad expanzióval ellentétben munka történik, ami a belső energia változását okozza. Azt, hogy a belső energia nő vagy csökken, az határozza meg, hogy a folyadékot vagy a folyadék által végzett munka határozza meg; ezt az expanzió kezdeti és végső állapota és a folyadék tulajdonságai határozzák meg.

A Joule-Thomson-expanzió során bekövetkező hőmérséklet-változást a Joule-Thomson-együtthatóval számukerültsítjük (μ_{JT}). Ez az együttható lehet pozitív

*hallgató, **egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézet Tanszéke
email: *vishalavishu691@gmail.com, **peter.bencs@uni-miskolc.hu

(hűtésnek megfelelő) vagy negatív (melegedés). Az együtttható nagyon magas és nagyon alacsony hőmérsékleten egyaránt negatív; nagyon magas nyomáson minden hőmérsékleten negatív. A maximális inverziós hőmérséklet (621 K az N_2 esetében) a nulla nyomáshoz közeledve következik be. Az N_2 gáz esetében alacsony nyomáson, magas hőmérsékleten negatív, alacsony hőmérsékleten pozitív.

2. FIZIKAI MECHANIZMUS

Két tényező változtathatja meg a folyadék hőmérsékletét adiabatikus expanzió során: a belső energia változása vagy a potenciális és a kinetikus belső energia közötti átalakulás. A hőmérséklet a termikus kinetikus energia (a molekulák mozgásához kapcsolódó energia) mérőszáma; így a hőmérséklet változása a termikus kinetikus energia változását jelzi. A belső energia a termikus kinetikus energia és a termikus potenciális energia összege. Így, még ha a belső energia nem is változik, a hőmérséklet változhat a kinetikus és a potenciális energia közötti átalakulás miatt; ez történik a szabad expanzióban, és a folyadék expanzió során jellemzően hőmérsékletcsökkenést eredményez. Ha a folyadékon vagy a folyadék által az expanzió során munka történik, akkor a teljes belső energia változik. Ez történik a Joule-Thomson-expanzióban, és a szabad expanziónál megfigyeltnél nagyobb mértékű melegedést vagy lehűlést eredményezhet [3].

A Joule-Thomson-expanzióban az entalpia állandó marad. Az entalpia, H , a következőképpen van meghatározva

$$H = U + PV \quad (1)$$

Ahol U a hőenergia, P a nyomás és V a térfogat. A Joule-Thomson-expanzió feltételei mellett a PV változása a folyadék által végzett munkát jelenti. Ha a PV növekszik, miközben H állandó, akkor az U -nak csökkennie kell, mivel a folyadék munkát végez a környezetében. Ez a hőmérséklet csökkenését eredményezi, és pozitív Joule-Thomson-együtthatót eredményez. Ezzel szemben a PV csökkenése azt jelenti, hogy a folyadékon munkát végeznek, és a belső energia nő. Ha a mozgási energia növekedése meghaladja a potenciális energia növekedését, akkor a folyadék hőmérséklete megnő, és a Joule-Thomson-együttható negatív lesz.

Ideális gáz esetén a PV nem változik a Joule-Thomson-tágulás során. Ennek következtében a belső energia nem változik; mivel a termikus potenciális energia sem változik, a termikus kinetikus energia sem változhat, és ezért a hőmérséklet sem változhat. Valódi gázokban a PV változik

A PV értékének és az azonos hőmérsékleten ideális gázra várható értéknek a hányadosát nevezzük összenyomhatósági tényezőnek, Z -nek. Egy gáz esetében ez alacsony hőmérsékleten általában kisebb, mint 1, magas hőmérsékleten pedig nagyobb, mint 1. Alacsony nyomáson a Z értéke mindig az egység felé mozog, ahogy a gáz tágul. Így alacsony hőmérsékleten a Z és a PV a gáz

tágulásával csökken; ha a csökkenés elég nagy, a Joule-Thomson-együttható negatív lesz.

2.1. A Joule-Thomson (Kelvin) együttható

A T hőmérséklet változásának sebessége a P nyomás függvényében egy Joule-Thomson-folyamatban (azaz állandó H entalpia mellett) a Joule-Thomson (Kelvin) együttható μ_{JT} . Ez az együttható a gáz V térfogata, állandó nyomáson mért hőkapacitása és hőtágulási együtthatója alapján a következőképpen fejezhető ki;

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = \frac{V}{C_p} (\alpha T - 1) \quad (2)$$

Az összefüggés bizonyítását lásd a Joule-Thomson-együttható származtatásánál. Az értéket általában $^{\circ}\text{C}/\text{bar}$ -ban (SI-egységek: K/Pa) fejezik ki, és a gáz típusától, valamint a gáz expanzió előtti hőmérsékletétől és nyomásától függ. Nyomásfüggése 100 bar nyomásig általában csak néhány százalékos. Minden valódi gáznak van egy inverziós pontja, ahol az értéke előjelet vált. Ennek a pontnak a hőmérséklete, a Joule-Thomson-inverziós hőmérséklet, a gáz tágulás előtti nyomásától függ.

Gáztágulás esetén a nyomás csökken, így a definíció szerint a ∂P előjele negatív. Ezt szem előtt tartva a következőekben megmagyarázzuk, hogy a Joule-Thomson-hatás mikor hűt vagy melegít egy valódi gázt:

1. Ha a gáz hőmérséklete \rightarrow az inverziós hőmérséklet alatt van \rightarrow akkor μ_{JT} pozitív \rightarrow mivel a ∂P mindig negatív \rightarrow így a ∂T negatív \rightarrow Tehát a gáz lehül.
2. Ha a gáz hőmérséklete \rightarrow az inverziós hőmérséklet felett van \rightarrow akkor μ_{JT} negatív \rightarrow mivel a ∂P mindig negatív \rightarrow így a ∂T pozitív \rightarrow Tehát a gáz melegszik.

A hélium és a hidrogén két olyan gáz, amelyek Joule-Thomson-inverziós hőmérséklete egy atmoszféra nyomáson nagyon alacsony (pl. a hélium esetében kb. 45 K, -228°C). Így a hélium és a hidrogén melegszik, ha állandó entalpiával, tipikus szobahőmérsékleten expanzióra kerül. Másrészt a nitrogén és az oxigén, a levegő két legnagyobb mennyiségben előforduló gázának inverziós hőmérséklete 621 K (348°C), illetve 764 K (491°C): ezek a gázok a Joule-Thomson-effektus révén szobahőmérsékletről lehűthetők. Ideális gáz esetén, mindig egyenlő nullával: az ideális gázok állandó entalpia mellett történő expanziójakor sem nem melegsznek, sem nem hűlnek [4].

2.2. Alkalmazások

A gyakorlatban a Joule-Thomson-effektust úgy érik el, hogy a gáznak egy fojtószerkezeten (általában egy szelepen) keresztül engedik expandálni, amelyet nagyon jól szigetelni kell, hogy megakadályozza a gázba vagy a gázból történő hőátadást. Az expanzió során a gázból nem vonnak ki külső munkát (a gáz nem expandálhat például turbinán keresztül).

A Joule-Thomson-féle tágulás során keletkező hűtés a hűtőtechnikában értékes eszközzé teszi a expanziót. A hatást a Linde-technikában szabványos eljárásként alkalmazzák a petrokémiai iparban, ahol a hűtőhatást a gázok cseppfolyósítására használják, valamint számos kriogén alkalmazásban (pl. folyékony oxigén, nitrogén és argon előállítására). Egy gáznak az inverziós hőmérséklete alatt kell lennie ahhoz, hogy a Linde-ciklus segítségével cseppfolyósítani lehessen. Ezért az egyszerű Linde-ciklusú cseppfolyósítók, amelyek a környezeti hőmérséklet-ről indulnak, nem használhatók hélium, hidrogén vagy neon cseppfolyósítására. A Joule-Thomson-effektus azonban még a hélium cseppfolyósítására is használható, feltéve, hogy a héliumgázt először 40 K inverziós hőmérséklete alá hűtjük [5].

2.3. A Joule-Thomson együttható származtatása

Nehéz fizikailag elgondolni, hogy mit jelent a Joule-Thomson együttható (μ_{JT}). Emellett a modern meghatározások nem a Joule és Thomson által használt eredeti módszert használják, hanem egy másik, szorosan kapcsolódó mennyiséget mérnek. Ezért hasznos, ha az alábbiakban leírtak szerint összefüggéseket vezetünk le más, kényelmesebben mérhető mennyiségek között.

Ezeknek az eredményeknek az eléréséhez az első lépés az, hogy a Joule-Thomson-együttható a három változót, T -t, P -t és H -t tartalmazza. A ciklikus szabály alkalmazásával azonnal hasznos eredményt kapunk; e három változóra vonatkoztatva a szabály a következőképpen írható le

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial H}\right)_T = -1. \quad (3)$$

Ebben a kifejezésben a három részleges derivált mindegyikének sajátos jelentése van. Az első az μ_{JT} , a második az állandó nyomású hőkapacitás, C_p , amelyet a következő módon határozunk meg

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \quad (4)$$

a harmadik pedig az izotermikus Joule-Thomson-együttható fordítottja, μ_{JT} , amelyet a következő módon határozunk meg

$$\mu_{JT} = -\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T. \quad (5)$$

Ez utóbbi mennyiség könnyebben mérhető, mint az μ_{JT} . Így a ciklikus szabályból származó kifejezés a következő lesz

$$\mu_{JT} = -\left(\frac{\mu_{JT}}{C_p}\right). \quad (6)$$

Ez az egyenlet használható a Joule-Thomson-együttható kiszámításához a könnyebben mérhető izotermikus Joule-Thomson-együtthatóból. A következőkben a

Joule-Thomson-együttható matematikai kifejezésére használjuk a folyadék térfogati tulajdonságainak függvényében.

A továbblépéshez a kiindulópont az entalpiára vonatkozó termodinamikai alapegyenlet; ez a következő

$$\partial H = TdS + VdP. \quad (7)$$

Ha most a hőmérsékletet állandó értéken tartjuk, és "elosztjuk" a következővel dP :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = T\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T + V \quad (8)$$

A bal oldali parciális derivált az izotermikus Joule-Thomson-együttható, a jobb oldali pedig a Maxwell-összefüggésen keresztül a hőtágulási együtthatóval fejezhető ki (μ_{JT}). A megfelelő összefüggés a következő

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = -V\alpha \quad (9)$$

Ahol α a hőtágulás köbös együtthatója. E két parciális derivált helyettesítésével a következő eredményt kapjuk

$$\mu_{JT} = -TV\alpha + V \quad (10)$$

Ez a kifejezés most már helyettesíthető a korábbi egyenletben a következőhöz:

Ez a Joule-Thomson-együttható (μ_{JT}) kifejezése az általánosan elérhető tulajdonságok, a hőkapacitás, a moláris térfogat és a hőtágulási együttható alapján. Megmutatja, hogy a Joule-Thomson-inverziós hőmérséklet, amelyenél nulla, akkor következik be, ha a hőtágulási együttható egyenlő a hőmérséklet inverzével. Mivel ez minden hőmérsékleten igaz az ideális gázokra (lásd: tágulás gázokban), az ideális gáz Joule-Thomson-tényezője minden hőmérsékleten nulla [6].

2.4. Joule második törvénye

Könnyen ellenőrizhető, hogy egy megfelelő mikroszkopikus posztulátumokkal meghatározott ideális gáz esetében $\alpha T = 1$, tehát egy ilyen ideális gáz hőmérséklet-változása Joule-Thomson-tágulás esetén nulla. Egy ilyen ideális gáz esetében ez az elméleti eredmény azt jelenti, hogy:

A belső energia egy ideális gáz rögzített tömegének belső energiája csak a hőmérséklettől függ (a nyomástól vagy a térfogattól nem).

Ezt a szabályt eredetileg Joule találta meg kísérletileg valós gázokra, és Joule második törvénye néven ismert. A finomabb kísérletek jelentős eltéréseket találtak tőle.

2.5. Hűtés és légkondicionálás

A fojtás hatására a gáz nyomáscsökkenésen megy keresztül, és bizonyos körülmények között a hőmérséklete is csökken. A jelenséget Joule-Thomson-effektusnak nevezik, és a gáz hőmérsékletváltozásával jár együtt. Ha a

folyamat olyan hőmérséklet- és nyomástartományban zajlik, amely biztosítja, hogy a hatás pozitív legyen (a gáz hőmérséklete csökken a nyomás csökkenésével), akkor a fojtás a gáz lehűlését eredményezi, és sikeresen alkalmazható gázok cseppfolyósítására. A következő követelményeknek kell megfelelni:

- Az érintett gázoknak nagyon alacsony telítési hőmérséklettel és nyomással kell rendelkezniük.

- Ahhoz, hogy a gáz pozitív Joule-Thomson-effektussal jellemezhető állapotba kerüljön, előzetes előkészítésre van szükség: a gázt elő kell hűteni kiegészítő klaszikus hűtőrendszerekben.

- A nagyon alacsony hőmérsékletek eléréséhez nagyon nagy nyomásesések szükségesek.

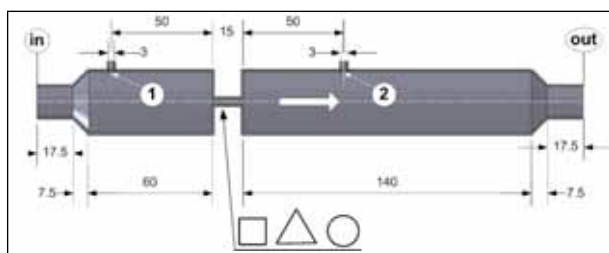
Például hidrogén esetében a fojtás előtti nyomásértéknek 190 K (kb. -83 °C) alatti előhűtés után 110 barral kell megegyeznie ahhoz, hogy pozitív Joule-Thomson-hatást érjünk el.

2.5. Dupla oszlopos kialakítás

A kétoszlopos nitrogén-visszavezetési eljárást az 1970-es évek végén fejlesztették ki. Az eljárást levegőválasztó üzemekben használják, és módosítható a nitrogén szénhidrogén-áramból történő frakcionálására. Ebben az eljárásban a nitrogént alacsony nyomáson, kriogén hőmérsékleten, jellemzően -310 °F-on választják el, ami megköveteli, hogy a betáplált gáz legfeljebb 40 ppm CO₂-t tartalmazzon, hogy a CO₂ ne fagyjon meg a kriogén oszlopban. Ez a rendszer kihasználja a tápgáz magas nitrogéntartalmát, hogy a kriogén oszlop visszaáramoltatásához a JT-effektus révén hűtést eredményezzen. Előnye az alacsony energiafogyasztás és az egyszerű konfiguráció, amely a levegő szétválasztó berendezés kialakításából származik. A levegőválasztó üzem tervezési koncepciójának földgázüzemekre történő adaptálásakor a tervezést úgy kell módosítani, hogy az üvegházhatású gázok kibocsátásának minimalizálása érdekében a nitrogénzellőzőben alacsony szénhidrogénszintet biztosítson.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott számítási eljárásokat alkalmazva kijelenthető, hogy jól számítható analitikai úton is a Joule-Thomson effektus különböző fojtási alakok esetén. Az 1. ábra mutatja az elemezni kívánt számítási modellt, melyen jól látható az elhelyezett fojtási hely és formák [7].



1. ábra. A számítási modell geometriája.

A számítások elvégzéséhez az AVL FIRE M szoftvert fogjuk használni. A számításokat a szoftverben beépített hőtechnikai modellek alkalmazásával fogjuk elvégezni. A jövőbeni kutatási feladatok folytatásaként különböző nyomások esetén fogjuk meghatározni a különböző nyomáscsökkenő elemek hatásait.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

The author is grateful to the AVL Company for the technical (software academic license) support of this research.

A szerzők köszönetüket fejezik ki az AVL cégnek a kutatás technikai támogatásért (akadémiai szoftver licenst).

5. IRODALOM

- [1] Allison, T. C., & Simons Eugene, S. (2022). Impacts of Hydrogen Transport in Pipelines.
- [2] Blokland, H., Sweelssen, J., Isaac, T., & Boersma, A. (2021). Detecting hydrogen concentrations during admixing hydrogen in natural gas grids. International Journal of Hydrogen Energy, 46(63), 32318–32330. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.221>
- [3] Brower, M., Petersen, E. L., Metcalfe, W., Curran, H. J., Füri, M., Bourque, G., Aluri, N., & Güthe, F. (2013). Ignition Delay Time and Laminar Flame Speed Calculations for Natural Gas/Hydrogen Blends at Elevated Pressures. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 135(2). <https://doi.org/10.1115/1.4007763>
- [4] Frank, E. D., Elgowainy, A., Reddi, K., & Bafana, A. (2021). Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from hydrogen delivery: A cost-guided analysis. International Journal of Hydrogen Energy, 46(43), 22670–22683. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.078>
- [5] Grigoriev, S. A., & Fateev, V. N. (2017). Hydrogen Production by Water Electrolysis. In Hydrogen Production Technologies (pp. 231–276). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119283676.ch6>
- [6] Mohammad, B. S., McManus, K., Brand, A., Elkady, A. M., & Cuppoletti, D. (2020, September 21). Hydrogen Enrichment Impact on Gas Turbine Combustion Characteristics. Volume 4B: Combustion, Fuels, and Emissions. <https://doi.org/10.1115/GT2020-15294>
- [7] Ono, H., Fujiwara, H., Onoue, K., & Nishimura, S. (2019). Influence of repetitions of the high-pressure hydrogen gas exposure on the internal damage quantity of high-density polyethylene evaluated by transmitted light digital image. International Journal of Hydrogen Energy, 44(41), 23303–23319. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.035>

HIDROGÉN KEVEREDÉSE FÖLDGÁZZAL - KOCKÁZATÉRTÉKELÉS

HYDROGEN MIXING WITH NATURAL GAS - RISK ASSESSMENT

Kolkar Nanjappa Sneha^{}, Nagy Nóra^{**}, Bencs Péter^{***}*

ABSTRACT

This research presents the production and potential uses of hydrogen. This overview study will provide an opportunity to define the problems and safety risks associated with hydrogen transport. Based on the safety risks presented, the flow characteristics of a given pipeline section (from an industrial task) will be investigated. Based on the investigations (using the presented safety risks), an assessment of the pipeline section problems will be carried out.

1. BEVEZETÉS

A világ kereskedelmi célú hidrogéntermelésének 48%-át, 30%-át, 18%-át és 4%-át négy elsődleges forrás, a földgáz, a kőolaj, a szén és az elektrolízis adja. Az ipari hidrogén fő forrása a fosszilis tüzelőanyagok. Általában a hidrogént a földgáz gőzzel történő átalakításával állítják elő.

Lehetőség van a következő primer energiaforrások alkalmazására: Földgáz, napenergia, szélenergia és biogáz vagy biometán. Biogáz a földgáz vagy biometán egy termokémiai folyamaton megy keresztül, amelyet gőzzel történő metánreformálásnak neveznek, ami gőzzel történő reakciót eredményez, és egy szintetikus gázt hoz létre, amely elsősorban hidrogénből áll. A víz hidrogénre és oxigénre történő szétválasztásához az elektrolízisnek nevezett technikát alkalmazzák, amely fő energiaforrásként földgázt, napenergiát vagy szelet használhat. Mindkét módszer hidrogén előállítását eredményezi [1].

- Elsődleges energiaforrás: A következő elsődleges energiaforrások alkalmazására van lehetőség: Földgáz, napenergia, szélenergia, biogáz vagy biometán.
- Termokémiai átalakítás: A biogáz A földgáz, más néven biometán egy termokémiai folyamaton, a gőz-metán reformján megy keresztül, amely gőzzel való reakciót eredményez, és egy szintetikus gázt hoz létre, amely elsősorban hidrogénből áll.
- Elektrolízis: A víz hidrogénre és oxigénre történő szétválasztásához az elektrolízisnek nevezett technikát alkalmazzák, amelynek fő energiaforrása földgáz, napenergia vagy szél lehet.

- Végző energiahordozó: Mindkét módszer hidrogén előállítását eredményezi.

A hidrogén energiamezőkbe történő beépítésének egyik módja a hidrogén szénhidrogének üzemanyag-adalékanyagaként történő felhasználása. A szénből és szénhidrogénekből előállított városi gázokban mindig is jelentős többségű hidrogén volt. Napjainkban a városi gázok többségét metán vagy földgáz teszi ki. A hidrogénnek a földgázhoz való hozzáadása előrevetíti a fokozatos átállást a hidrogénre, mint energiaforrásra. A belsőégésű motorok üzemanyagai is használhatnak hidrogént adalékként.

Kimutatták, hogy a hidrogén földgázmotorokba történő beépítése javíthatja azok égési képességeit és csökkentheti a szennyezőanyag-kibocsátást, különösen a sovány égésű üzemmódban. Ha ezt a keveréket használják üzemanyagként, az autóknak lényegesen kevesebb nitrogén-oxidot, szén-monoxidot és szénhidrogént kellene kibocsátaniuk. A hidrogéntartalmú földgázzal működő közlekedési rendszer sikeres módszer lenne a nagyvárosi területek környezeti problémáinak csökkentésére és az energiaellátás infrastruktúrájának hidrogénnel való kiegészítésére.

A megbízható, költséghatékony és fenntartható energiaforrásokkal rendelkező jövőben a hidrogén kulcsfontosságú energiahordozó lehet. Ebben a kutatásban a hidrogénnek a földgázvezeték-hálózatokba való beépítésének gondolatával kapcsolatos fontos aggályokat vitatjuk meg. A bekeverés megfelelő körülmények között és viszonylag alacsony hidrogénkoncentráció mellett csak minimális kiigazításokat igényelhet a csővezeték-hálózat működésében és karbantartásában. A hidrogénkeverék-összetevőt át lehet vinni a végfelhasználói rendszerekbe, vagy a hidrogént el lehet különíteni és felhasználni az olyan eszközökben, mint a mobil vagy helyhez kötött üzemanyagcellák.

Ha az energiarendszerek szén-dioxid-mentessé válnak, a hidrogén hasznos energiahordozó lehet. Számos alacsony szén-dioxid-kibocsátású energiaforrás, például biomassza, nukleáris és megújuló villamos energia, valamint szén vagy földgáz szén-dioxid-leválasztással és -megkötéssel hidrogén előállítására használható, amely aztán számos célra felhasználható, például fűtésre és áramtermelésre otthonok, vállalkozások és iparágak

hallgató, **tanársegéd, *egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszéke*

*email: *snehakolkar88@gmail.com, **nora.nagy@uni-miskolc.hu, ***peter.bencs@uni-miskolc.hu*

számára, valamint szezonális energiatárolásra. Az egyik legnagyobb kihívás azonban még mindig a hidrogénnek az összes ilyen különböző felhasználási célú felhasználásához szükséges infrastruktúra kiépítése. Annak érdekében, hogy a hidrogén előnyeit az új speciális infrastruktúra kiépítésének költségei nélkül élvezhessék, a kutatók, a vállalkozások, valamint a helyi és nemzeti kormányok egyaránt vizsgálják a hidrogénnek a földgázvezeték-hálózatokba való bekeverését. E stratégia számos lehetséges előnyét számos hátránya ellensúlyozza.

A földgázt jelenleg olyan nehezen szén-dioxid-mentesíthető ágazatokban használják, mint az energiacsúcsok energiatermelése, a lakossági és kereskedelmi fűtés, valamint az ipari műveletek. Az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogénnek a földgázzal való keverése potenciálisan csökkentheti ezen ágazatok szén-dioxid-intenzitását. A földgáz és a földgáztól függő valamennyi alkalmazás szén-dioxid-kibocsátása csökkenthető lenne, ha az alacsony szén-dioxid-kibocsátású forrásokból, például szél- és napenergiából előállított hidrogént beépítenék a földgáz-infrastruktúrába. Azáltal, hogy a hidrogén a hálózati villamos energiával párhuzamos energiahordozóként szolgál - ezt a funkciót a földgázhálózat már most is ellátja -, tovább növelheti az energiabiztonságot és az ellenálló képességet. Ha a hálózatnak villamosenergia-csúcsra van szüksége, a hidrogén - a földgázhoz hasonlóan - módot kínál a villamosenergia-ellátásra. A hidrogén a villamos energia helyettesítőjeként is használható, például az otthonok és a vállalkozások fűtésére. Ahogy egyre több változó megújuló energiaforrás kezd áramot szolgáltatni az elektromos hálózatba, a hidrogén rugalmas elektromos terhelésként is működhet, ami egyre előnyösebbé válik [1].

Különösen a víz elektrolízise kínál egy lehetséges módszert a hidrogén minimális költséggel történő előállítására, extra megújuló villamos energiából. Mivel a hidrogénnek a földgázhálózatokba való beépítése elősegítheti az egész gazdaság szén-dioxid-mentesítését, miközben megőrzi a földgázhálózatok által a helyi, nemzeti és nemzetközi energiarendszerek számára nyújtott előnyök egy részét, számos vállalkozás, kutató és kormány érdeklődik az ötlet iránt. A fent említett geológiai tárolóeszközök mellett a földgázhálózatok az elektromos hálózattal párhuzamosan egy olyan energiavektort kínálnak, amely megnövelt energiaátviteli kapacitást és eredendő tárolási potenciált kínál. A földgázhálózatok e tulajdonságai növelik az energiarendszer rugalmasságát és biztonságát, és az Egyesült Államok már most is jelentős földgázhálózattal rendelkezik.

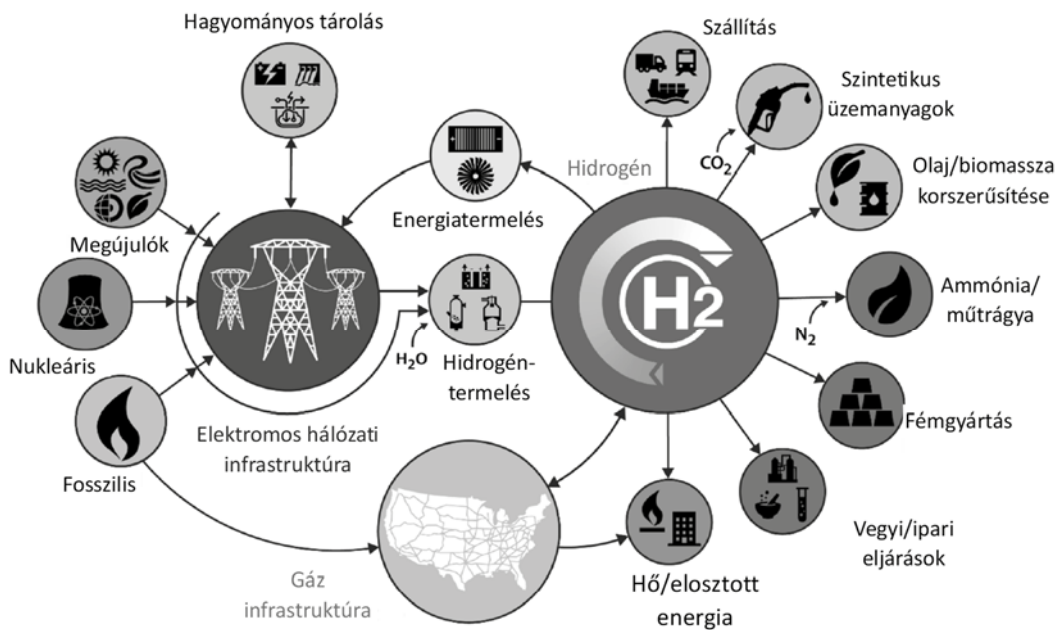
2. HIDROGÉNNEL KEVERT FÖLDGÁZ ÉGÉSTÉSE

A földgáz főként metánból áll. A hidrogén és a metán égési tulajdonságai. A hidrogén és a metán égési képessége. A metánhoz képest a hidrogén gyorsabban ég,

alacsonyabb a minimális gyulladási energiája, és szélesebb gyúlékonysági korlátokkal rendelkezik. Ezek a tulajdonságok a hidrogén-levegő keverékek égőműves égétekor - előkeveréssel vagy anélkül - a láng tulajdonságai miatt nehéz eloltani, és egyenesen elromlik. Az égő égése során jelentős mennyiségben keletkeznek nitrogén-oxidok, amelyek mennyisége 500 ppm. Bár a levegő előkeverési arányának emelése jelentősen csökkenti az NOx-tartalmat, ez azonban növeli a visszagyulladás valószínűségét. Az NOx-termelés csökkentése és a visszagyulladás megakadályozása közötti kompromisszumot "az égőkkel történő hidrogénégés dilemmájának" nevezik. Ezzel szemben a hidrogén kedvező és kedvezőtlen égési tulajdonságaiból a következő előnyök adódnak, amikor földgázzal keverve égetjük. A gyúlékonyság növekedése miatt az égő égése folyamatosan folyamatosság válik és a gyújtási, illetve visszagyújtási energia csökkenése miatt. Az egy térfogatra jutó égési energia növekedése lehetővé teszi, hogy kis égővel nagy mennyiségű hőenergiát termeljenek. A nagyobb levegő előkeverési arány lehetővé teszi az NOx-termelés elfojtását visszagyújtás nélkül [2].

Ahelyett, hogy a gazdaság szén-dioxid-mentesítésében kizárólag a villamosításra támaszkodnánk, költségkímélőbb és rugalmasabb lehet a meglévő gázhálózatok további használata a hidrogéntermeléshez. Emellett a földgázhálózatok hidrogénüzemre való átállítása bővítheti az általuk kiszolgálható piacokat. A földgáz hagyományos felhasználási területein - mint például a villamosenergia- és hőtermelés, a vegyipar és az ipari folyamatok, valamint a fémek és műtrágyák gyártása - kívül a hidrogén felhasználható szintetikus üzemanyagok előállítására vagy közvetlenül hidrogénüzemű autók üzemanyagaként is. A hidrogénskála koncepcióját az 1. ábra mutatja be a hidrogén számos előállítási módszerével és felhasználási módjával együtt. A földgáz hagyományos felhasználási módjai mellett, mint például a villamos energia, hő, vegyi anyagok és ipari folyamatok előállítása, valamint fémek és műtrágyák gyártása, a hidrogén szintetikus üzemanyagok előállítására vagy közvetlenül hidrogénüzemű autók üzemanyagaként is felhasználható.

Bár a hidrogénnek a meglévő földgáz-infrastruktúrába való beépítése számos előnnyel járhat, ezt számos olyan megfontolás és ismeretlen tényező nehezíti, amelyek azal kapcsolatosak, hogy a meglévő földgázvezeték-infrastruktúra mennyire működne jól a hidrogén használata esetén. A földgázszállító és -elosztó hálózatok különböző részeinek kompatibilitása az egyik ilyen elem és bizonytalanság. Ezek a hálózatok jelenleg a földgáz kitermeléséből, feldolgozásából, szállításából és a végfelhasználókhöz történő elosztásából állnak; a hidrogén bevezetése hatással lehet e hálózatok bármelyikére vagy mindegyikére. A földgáz és a hidrogén termodinamikai, szállítási és égési jellemzői nagyon eltérőek [5].



1. ábra. A számítási modell geometriája [5].

A hidrogénkeverés szerkezeti integritásával és biztonságával kapcsolatos aggályok közé tartoznak a gázszivárgások és a csővezetékrendszerek anyagromlása. Még mindig vannak megválaszolatlan problémák azzal kapcsolatban, hogy hogyan lehet ezt figyelembe venni annak meghatározásakor, hogy az acélszövezetek mennyire kompatibilisek a hidrogénnel. A gáznemű hidrogén jelentős hatással van a csővezetékek acéljainak fáradás- és törésállóságára. További vizsgálatokra van szükség a polietilén csővezeték-anyagok hidrogénnel szembeni tűrőképességének megállapításához, mivel a hidrogén hatásai nem teljesen ismertek.

3. BIZTONSÁGI ÉRTÉKELÉS [3]

Nehéz megjósolni, hogy a hidrogénnek a földgázvezeték-rendszerbe történő beillesztése milyen hatással lesz a végfelhasználói készülékekre és a meglévő hálózati infrastruktúrára, mivel a gázkombináció termodinamikája és szállítási tulajdonságai drasztikusan megváltozhatnak. Ezeket a nehézségeket vizsgáljuk fel, valamint a földgázvezeték-rendszer azon helyeit, ahol ezek minden esetben jelen vannak. E problémák megoldása nélkül a hidrogén gázvezetékbe történő befecskendezése káros hatással lehet a gázvezeték gazdaságosságára, biztonságára és megbízhatóságára. A biztonság, a megbízhatóság és a pénzügyi fenntarthatóság biztosítása érdekében a hidrogénkeverési lehetőségek mérlegelésénél figyelembe kell venni a szükséges berendezés-korszerűsítéseket és a hálózat üzemeltetési gyakorlatának megváltoztatását. Ezeket a kérdéseket a következő alfejezetek mind a szállító-, mind az elosztóhálózatokra vonatkozóan tárgyalják, a hálózati szakaszoktól az egyes berendezésekig terjedően.

- Gázfelhalmozódás.
- Robbanások a védett térben.
- A szállítóvezetésekből eredő kockázat.

3.1. Gázfelhalmozódás

Két kísérleti kiadásban az egyik egy nagyobb, tipikusabb kereskedelmi vagy ipari épületek helyiségében, a másik pedig egy kisebb, tipikusabb családi szobában a természetes vizsgálat a gázfelhalmozódás viselkedését vizsgálta. Megállapították, hogy a keverékek gázfelhalmozódási viselkedése hasonlít a tiszta földgázéhoz. A hidrogén nem vált ki a keverékből, ahogyan azt várták. Nagyobb gázkoncentrációt eredményezett a megnövelt áramlási sebesség, bár a vártnál kisebb mértékben. Az 50%-os hidrogénig terjedő keverékek esetében a kibocsátás utáni állandósult koncentráció gyakran csak kissé magasabb, míg a 70%-nál nagyobb hidrogénkeverékek esetében a koncentráció észrevehetőbben emelkedik.

3.2. Robbanások a védett térben

A 20%-nál kevesebb hidrogént tartalmazó keverékek esetében a zárt légtérű robbanások intenzitásának arányos növekedése alacsony volt a tisztán földgázzal zárt térben történő robbanásokhoz képest. Az 50%-nál több hidrogént tartalmazó keverékek esetében a túlnyomás és az ennek megfelelő kockázat vagy kár jelentősebb növekedése volt tapasztalható. Ha szellőztetést alkalmaznak, vagy csökkentik a bezártságot létrehozó szerkezeti szűkületet, a nagyobb hidrogénkoncentrációjú gőzfelhőrobbanásokból származó túlnyomás jelentősen csökkenthető.

3.3. A szállítóvezetésekből eredő kockázat

A kockázatot itt a következő általános egyenlet segítségével határozzuk meg:

Kockázat = a csővezeték meghibásodásának gyakorisága × a gyulladás valószínűsége × a tűz következményei.

A kockázat egyéni és társadalmi becslése egyaránt lehetséges. Annak lehetősége, hogy egy személy egy éven belül meghal, a kockázat egyéni meghatározásának eredménye. Természetesen egy kockázatbecslési algoritmus segítségével jöttek ki ezek a számok. Az átviteli csövek kockázati tényezője a következő volt. A csővezeték szakadása került a középpontba.

4. KOCKÁZAT ELEMZÉS

A hidrogént csővezetéken keresztül kell elosztani és szállítani ahhoz, hogy energiahordozóként lehessen használni. A meglévő földgázvezeték-hálózat módosításokkal történő hasznosítását, amelynek során a hidrogént vagy a földgázzal keverve, vagy tisztán szállítják a hálózat meghatározott részein, a két csővezeték-szállítási lehetőség egyikeként vizsgálták. egy teljesen új hálózatot, amely néhány egyedi átmérőjű, nyomású és anyagú jellemzővel rendelkezik, és amely a tiszta hidrogénre összpontosít. A földgázhálózatba vagy a speciális hidrogénhálózatba történő potenciális tömegáramlás a hidrogéntermelő kapacitásoktól, valamint a befecskendezési körülményektől függ. A hidrogén előállításának két módszere a víz elektrolízis (szél- vagy fotovoltaikus energiával együtt) és a gőzzel történő metánreformálás gázosítással. A földgáz/hidrogén keverékek csővezetékes szállítására kétféle megoldás lehetséges: hidrogén befecskendezés a regionális földgázhálózatokba. Ebben az esetben a hidrogéntartalom kevesebb, mint 20%. A hidrogén befecskendezése a földgázhálózatba országos szinten. Ebben a forgatókönyvben a hidrogéntartalom kevesebb, mint 10% [4].

4.1. Összeegyeztethetőség, életrciklus-kibocsátás, műszaki-gazdasági elemzés [4]

1. A csővezetékek és csővezetékek hidrogénnel való kompatibilitása: Az SNL és a PNNL értékeléseket végez a fém és polimer csővezetékek és csővezetékek (pl. acél és polietilén) anyagainak élettartamának becslésére, ha keverékeket használnak. Ezeket az információkat beépítik egy nyilvánosan elérhető modellbe, amely a csővezetékek élettartamának becslésére használható a legfontosabb mérnöki feltételezések mellett.

2. Életrciklus-elemzés: Az ANL elemezni fogja a hidrogén- és földgázkeverékeket használó technológiák, valamint az alternatív útvonalak, például a szintetikus földgáz életrciklus-kibocsátását.

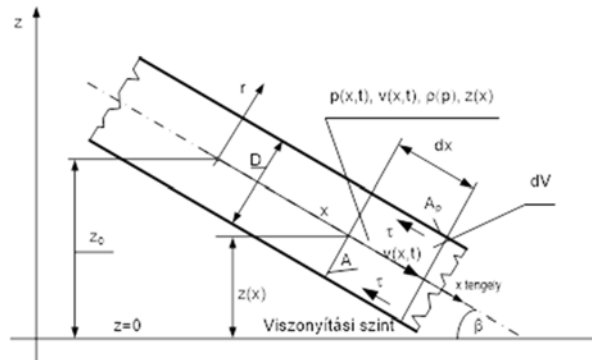
3. Technikai-gazdasági elemzés: Az NREL szám- szerűsíteni fogja a hidrogén előállításának és a földgáz- hálózaton belüli keverésének költségeit és lehetőségeit, valamint az alternatív utakat, például a szintetikus föld- gázt.

4. A hidrogén potenciáljának kiszélesítésére irányuló kutatás erőfeszítése a HFTO által vezetett, az SNL és a PNNL által vezetett Hidrogén Anyagok Kompatibi- litási Konzorcium (H-Mat), amely nemzetközileg

elismert keretrendszer a hidrogén-anyagok kompatibili- tásának tanulmányozására.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott hidrogén bekeverési lehetőségek és azok hatása alapján egy ipari feladatok keresztül vizsgáljuk a hidrogén hatását egy csővezetékben (1. ábra).



2. ábra. A számítási modell geometriája.

A számítások elvégzéséhez az AVL FIRE M szoftvert fogjuk használni. A számításokat a szoftverben beépített áramlástechnikai modellek alkalmazásával fogjuk elvé- gezni. A jövőbeni kutatási feladatok folytatásaként kü- lönböző nyomások esetén fogjuk meghatározni a kiala- kuló üzemállapotokat.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

The author is grateful to the AVL Company for the technical (software academic license) support of this re- search.

A szerzők köszönetüket fejezik ki az AVL cégnek a kutatás technikai támogatásért (akadémiai szoftver li- cense).

7. IRODALOM

- [1] Topolski, K., Reznicek, E. P., Erdener, B. C., San Marchi, C. W., Ronevich, J. A., Fring, L., Simmons, K., Guer-ra Fernandez, O. J., Hodge, B.-M., & Chung, M. (2022). Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology. www.nrel.gov/publications.
- [2] International Energy Agency. (2019). The Future of Hydrogen.
- [3] Allison, T. C., & Simons Eugene, S. (2022). *Impacts of Hydrogen Transport in Pipelines*.
- [4] Vries, D., Florisson, O., & Tiekstra, G. C. (2007). SAFE OPERATION OF NATURAL GAS APPLI- ANCES FUELED WITH HYDROGEN/NATU- RAL GAS MIXTURES (PROGRESS OBTAINED IN THE NATURALHY-PROJECT).
- [5] Ruth, M., Jadun, P., Gilroy, N., Connelly, E., Board- man, R., Simon, A. J., Elgowainy, A., & Zuboy, J. (2020). The Technical and Economic Potential of the H2@Scale Hydrogen Concept within the United Sta- tes. <https://doi.org/10.2172/1677471>

GÉPÉPÍTŐ ALUMÍNIUM PROFIL CENTRÁL FURATÁNAK TERHELHETŐSÉGE

THE LOAD-BEARING CAPACITY OF THE CENTRAL HOLE OF OF AN ALUMINIUM PROFILE FOR MECHANICAL ENGINEERING

Besenyei István, doktorjelölt, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet
Dr. Bihari Zoltán, egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

1. ABSTRACT

The use of aluminium profiles in mechanical engineering is becoming more and more common these days. Their versatile appearance is as varied as their potential uses. However, the actual load capacity of these profiles is not fully described in the literature.

2. BEVEZETÉS

Ha a XX. század vége felé egy szerkezetet kellett tervezni, akkor a legegyszerűbb megoldást az jelentette, hogy hidegen vagy melegen hengerelt acélszelvények felhasználásából építették össze magát a szerkezetet. A szelvények egymáshoz illesztéséhez valamilyen hegesztési technológiát használtak.

Az anyag szilárdságával összemérhető nagy szilárdságú hegesztett kötés alakítható ki, ezáltal a komplett szerkezet teherbírása is lényegesen nagyobb lesz. A geometriai felépítésről illetően nagyon sokféle kialakításra ad lehetőséget ez a technológia. Az így felépülő szerkezet ellenállóbb a rezgésekkel szemben (ha egy darabnak tekintjük), mint egy több darabból álló, csavarozott konstrukció.

Ezenkívül a szilárdsági vizsgálatok könnyen elvégezhetők manuálisan és végeselemes szoftver felhasználásával is.

A hegesztési technológia hátrányai közé tartozik azonban a nagy hőközlés, ami az anyagok vetemedését eredményezheti, valamint a korlátozott anyagválaszték. Ezenkívül számos utómunkát igényel (hegesztés utáni feszültségmentesítés, varratok köszörülése, korrózióvédelem, stb.)

Ezek a hátrányok a gépépítő alumíniumprofilok alkalmazásával elkerülhetők.

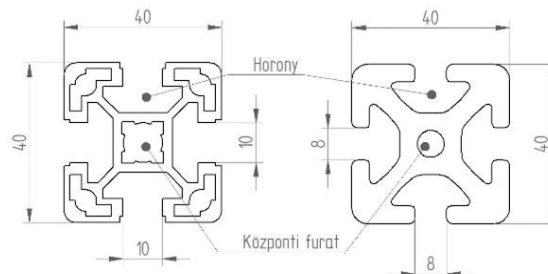
3. GÉPÉPÍTŐ ALUMÍNIUM PROFILOK

A gépépítő alumínium profilok napjaink ipari gyakorlatának az egyik legkedveltebb építőelemei közé tartoznak.

Ezek a profilok különböző méretükben és különböző keresztmetszetekben kaphatók. Az egyes profilok forgácsolási megmunkálást követően csavarkötéssel könnyen csatlakoztathatók egymással, de léteznek fúrásmentes összekötők is, amik megkönnyítik a szerelést.

Az alumínium profilok hátránya viszont, hogy alkalmazásuk lényegesen nagyobb költségáfordítást igényel más technológiákhoz képest. Továbbá egy alumínium profilokból álló összetett szerkezet végeselemes analízise sem egyszerű. A bonyolult geometriának köszönhetően sokkal több csomópont keletkezik, amit egy bizonyos elemszám fölött a szoftver csak nehezen tud kezelni. Ennek ellenére változatos megjelenésüknek és szerelhetőségüknek köszönhetően manapság egyre több szerkezetnél használják (pl.: vázszerkezet kialakításánál, állványok készítésénél, stb.)

Az alumínium profilokból történő gépépítés jellemzően a profilok hornyaiban elhelyezett horonyanyák vagy kalapácsfejű csavarok alkalmazásával történik. Ritkábban a profilok központi furatába kerülő menetes kötőelemek segítségével jön létre a kívánt geometria. Ez a tanulmány utóbbi esetet vizsgálja különböző gyártók különböző méretű termékein keresztül.

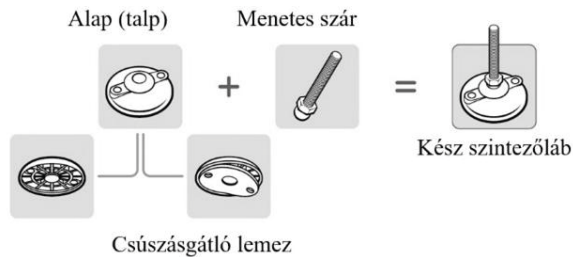


1. ábra: 4040-es Bosch profil (balra) és 4040-es Item profil (jobbra) keresztmetszete [3] [4]

Az esetek egy jelentős részében a gépek, állványok stabilitásáért, szintezéséért felelős géplábak kerülnek a centrál furatba.

4. GÉPLÁBAK

A géplábak több elemből álló, kereskedelmi forgalomban megtalálható gépelemek. Főbb részeik: menetes szár, talp, csúszásgátló, ill. rezgéscsillapító elem.

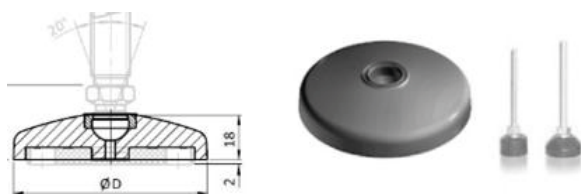


2. ábra: A géplábak felépítése [2]

A géplábak kritikusnak ítélt elemei esetén a gyártó katalógus adatokkal segíti a tervezés folyamatát. A szakirodalomban [2] megtalálható, hogy a különböző elemek esetén milyen módszerrel végezték a vizsgálatot.

Például a menetes szárazakat függőlegesen terheltek egy szabványos ipari anyán. A kezdeti kb. 1500 [N] függőleges irányú terhelés után lassan és egyenletesen kezdték el növelni a terhelést addig, amíg a teljes egységnek $1,5 \pm 0,5$ [mm]-rel meg nem változott a hossza.

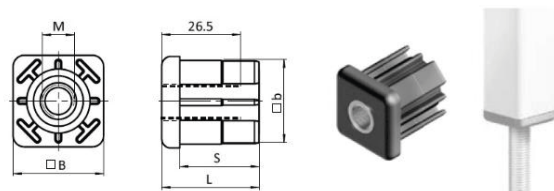
A géplábak talpait acéllemezekre (felfogató alapra) helyezték el. Oldalirányú terhelés, valamint dinamikus igénybevétel nem érte a vizsgálat során ezen elemeket. Statikus nyomó igénybevétel alapján kerültek a katalógusba azok a terhelhetőségek, amelyeket a tervezés során figyelembe lehet venni.



3. ábra: Nagy szögbeállásra alkalmas beálló talp, valamint géplábak összeszerelve [2]

Egy másik vizsgálat során a menetes perselyeket és betéteket (4. ábra) addig terheltek, amíg a törés be nem következett. A vizsgálatokat egyenként három mintán végezték el.

A katalógusban a gyártó külön felhívja a figyelmet arra, hogy ezek a terhelési adatok inkább tájékoztató jellegűek, teljes mértékben nem szabad rájuk hagyatkozni, hanem érdemes egyéni vizsgálatokat elvégezni.



4. ábra: Menetes persely és csatlakozása profilhoz [2]

Bár a talpakra és a menetes szárazakra vonatkozóan a terhelések adottak, egy összeállított vázszerkezet maximális terhelhetőségét a leggyengébb láncszem maximális terhelhetősége adja. Így nem szabad figyelmen kívül hagyni a számításnál az alumínium profilokra vonatkozó hatásokat sem.

Azok a gyártók, amelyek összekötő elemek gyártásával foglalkoznak, csak ritkán adják meg a csatlakozó elemekre vonatkozó terheléseket, mivel állításuk szerint egy összetett szerkezet gyenge láncszeme az alumínium profil lesz.

A gépépítő alumínium profilokhoz a géplábak többféleképpen csatlakoztathatók. A leggyakrabban alkalmazott módja a szerelésnek, ha a profil központi furatában egy előre kialakított menetes részben rögzítjük a menetes szárazakat.

Ez a cikk az alumínium gépépítő profilok centrál furatát vizsgálja és arra próbál választ adni, hogy mekkora az a maximális terhelés, aminél még nem keletkezik számottevő elváltozás, esetleg roncsolódás.

5. VIZSGÁLATI SZEMPONT ÉS VÁRHATÓ EREDMÉNYEK

A kialakított koncepció szerint az alumínium profil előre kialakított menetes furatába adott mélységig beletekerjük egy gépláb menetes szárát. Ezt a géplábat centrális axiális húzó vagy nyomó erővel terheljük, amíg valamilyen károsodás be nem következik.

A jellemző igénybevétel a menettő hajlítása lesz. A felületi nyomástól eltekinthetünk, mivel a menetes kötőelemeknél a súrlódást, kopást venné figyelembe. A szilárdsági számítások elvégzéséhez a terhelt elemek anyagjellemzőinek ismerete nélkülözhetetlen. A katalógusokban az alumínium profilok anyagára a gyártók az 1. táblázat szerinti értékeket adják meg.

Egy másik fontos adat, amire szükségünk lehet, hogy mekkora biztonsági tényezővel érdemes számolni. Mivel menettő hajlításnál azt a legnagyobb terhelést keressük, aminél a menet

megszakad, ezért 1-es biztonsági tényezővel javasolt számolni, vagyis a tönkremeneteli határt keressük.

1.táblázat: Bosch és Item profilok anyagára vonatkozó adatok DIN (ISO) szabvány szerint. [3; p. 324.]

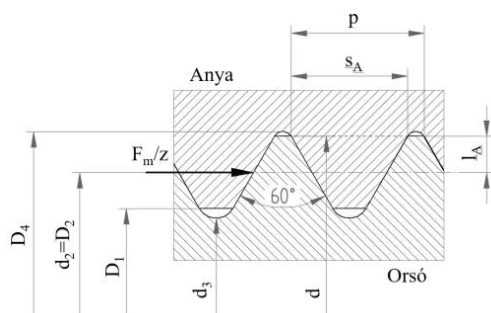
Anyagjelölés:	AlMgSi 0.5 F25
Anyagszám:	3.3206.7
Szakítószilárdság:	$R_m=250 \text{ N/mm}^2$
Egyezményes folyáshatár:	$R_{p0,2}=200 \text{ N/mm}^2$
Rugalmassági modulus:	$E = 70000 \text{ N/mm}^2$
Felületi keménysége:	300 HV

A legismertebb gépépítő profilokat a 2020; 3030; 4040; 5050 és 6060 jelöléssel látták el. A Bosch forgalmazza még a 4545 profilt is, de ez a konkurens gyártóknál nem jellemző, ezért most nem vizsgáljuk. Ezeknek a centrál furatába más-más keresztmetszetben ki lehet alakítani M5-től M12-ig terjedő menetes furatokat. Ezekre a menettípusokra javasolt elvégezni a számításokat. A különböző méretű menetek geometriai adatait szabvány rögzíti. A geometria ismeretében menetű hajlításra kell vizsgálni az anya (jelen esetben az alumínium profil) terhelhetőségét. A szilárdsági ellenőrzések során az alap összefüggés ([1] szerint), hogy a redukált feszültségnek kisebbnek vagy egyenlőnek kell lennie, mint a megengedhető feszültség.

$$\sigma_{red} \leq \sigma_{meg} \quad (1)$$

Tiszta hajlítást feltételezve a redukált feszültség a hajlító nyomaték és a keresztmetszeti tényező hányadosa. Az összefüggésekben szereplő geometriai jelöléseket az 5. ábra mutatja. A „z” az érintkező menetek száma.

$$\sigma_{red} = \frac{M_{hj}}{K} = \frac{\frac{F_m(t)}{z} \cdot l_{A(t)}}{\frac{D_{4(t)} \cdot \pi \cdot s_{A(t)}^2}{6}} \quad (2)$$



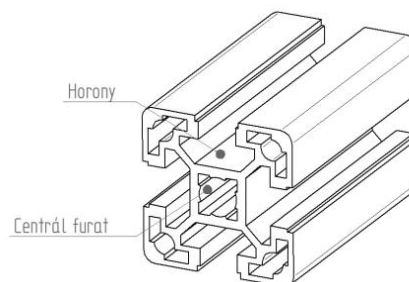
5. ábra: Menetű hajlítás geometriai méretei

Átalakítva az egyenletet megkapjuk, hogy mennyi az egy menetre jutó megengedhető terhelés az anyára vonatkoztatva:

$$F_{m(t)} = \frac{R_m \cdot z \cdot D_{4(t)} \cdot \pi \cdot s_{A(t)}^2}{s \cdot l_{A(t)} \cdot 6} \quad (3)$$

A fenti összefüggések az Item által forgalmazott profilokra érvényesek. Az egyes geometriai paraméterekben az „I” index erre utal. A továbbiakban a „B” indexet a Bosch profilok esetén alkalmazzuk.

A Bosch kompatibilis profiloknál be kell vezetni egy új méretet. Ez az ún. „t” méret, ami a központi furat körül található hornyoknak a szélessége. Ezek azt a célt szolgálják, hogy ne kelljen a menetfúrást egy menetfúró szerszámmal elvégezni a profil központi furatában, hanem egy speciálisan kialakított menetű csavarral forgácsolás nélküli menetformázást hozhassunk létre. Ez a „t” szélességű, és „n” darabszámú horony (6. ábra) azonban gyengíti a kötést.



6. ábra: Hornyok a centrál furatban

A hornyok figyelembe vételével a keresztmetszeti tényező az alábbiak szerint módosul:

$$K_{(B)} = \frac{(D_{4(B)} \cdot \pi - t \cdot n) \cdot s_{A(B)}^2}{6} \quad (4)$$

Ebben az esetben a terhelőerő:

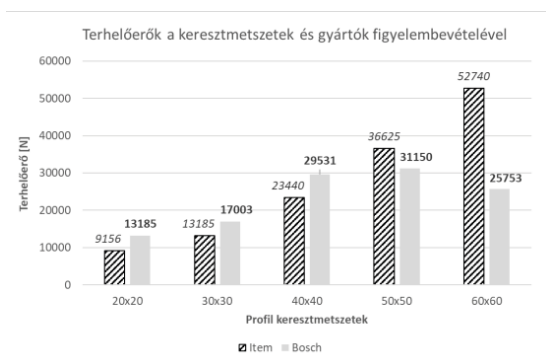
$$F_{m \text{ Bosch}} = \frac{R_m \cdot z \cdot (D_{4(B)} \cdot \pi - t \cdot n) \cdot s_{A(B)}^2}{s \cdot l_{A(B)} \cdot 6}$$

Az összefüggések ismeretében a két gyártó profiljait az alábbi módon hasonlítottuk össze:

1. A profilok központi furatai alapján meghatároztuk, hogy a különböző profilkeresztmetszetekbe milyen méretű menetes furat alakít-

ható ki. Ezek az értékek a profilok mérete alapján és az egyes gyártók esetében is eltérő.

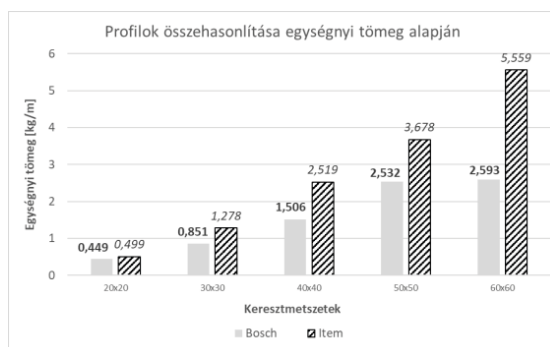
2. A geometria ismeretében a már korábban említett vizsgálati módokon a szakítószilárdságot figyelembe véve a menet elszakadását kerestük, vagyis azt, hogy ez a károsodás mekkora terhelőerő hatására következik be. Az alábbi diagram jól szemléltet az Item és a Bosch profilok terhelhetőségét.



7. ábra: Terhelőerők a profilméretetek és a gyártók figyelembevételével

6. KÖVETKEZTETÉSEK

A Bosch profilok központi furatai ugyan hornyokkal kikönnnyítették, azonban sokkal nagyobb névleges méretű menetes szár befogadására alkalmasak, mint az ugyanolyan keresztmetszetű Item profil. Ennek oka, hogy a Bosch profilok nagyobb központfurattal rendelkeznek. (Például a 4040-es keresztmetszet esetén az ITEM profilban M8-as menetes furat, míg a Bosch profilban M10-es furat alakítható ki.) Nyilván ahogy a menet mérete növekszik, úgy nő a teherviselő képessége is.



8. ábra: Profilok összehasonlítása egységnyi tömeg alapján

A két gyártó profiljait nem csak terhelhetőség szerint, de egységnyi hosszra vonatkoztatott tömeg alapján is összehasonlítottuk. A 8.

ábra diagram formában azt mutatja, hogy a különböző gyártók egyes profiljainak 1 m-es darabjai mekkora tömegűek. Egyes forgalmazók szerint a különböző gyártók által hengerelt alumínium ötvözetek összetételében nincs számottevő különbség.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálat eredményei azt igazolják, hogy különböző keresztmetszetű Bosch profilok sokkal könnyebbek, mint a hasonló keresztmetszettel rendelkező Item profilok.

A terhelhetőséget illetően a kisebb keresztmetszetű profiloknál a Bosch, míg a nagyobb keresztmetszeteknél az Item profilok bírnak el nagyobb terhelést.

A 8. ábrán látható diagram tanúsága alapján megállapítható, hogy valamennyi méret esetén az Item jelentősen több alapanyagot használ fel a profil előállításánál. Ennek a jövőbeli vizsgálatok során lesz jelentősége, amikor a terhelhetőséget, a profilhoz felhasznált alapanyag mennyiségével, valamint egyéb gyártási költségek figyelembevételével, megfelelő súlyozással vesszük figyelembe.

8. FORRÁSOK

- [1] Zsáry Árpád: *GÉPELEMEK I. kötet*, Tankönyvkiadó, Budapest, 1989.
- [2] FATH Components: *Themenkatalog Maschinenbaukomponenten* 18, 1. Auflage, Februar 2018.
- [3] Rexroth Bosch Group: *Aluminium Structural Framing System*, Version 6.0
- [4] Item Aluprofil katalógus: (www.easy-systems.eu/wp-content/uploads/2016/05/2_Series_40_EASY_ENG_20012016.pdf), (letöltés dátuma: 2023.09.11.)
- [5] Lipro Modular System: (www.entra-sys.hu/pdf/Modularis_rendszer.pdf), (letöltés dátuma: 2023.09.11.)
- [6] MayTech: *The Profile System*, English 1/2018
- [7] Syma-System30: *Technical documentation*
- [8] www.boschrexroth.com/hu/hu/termekek/termekcsoportok/szerelестехника/temak/aluminium-profilok-megoldasok-es-alkatreszek/ (letöltés dátuma: 2023.09.11.)
- [9] <https://uk-product.item24.com/en/nc/productsearch/> (letöltés dátuma: 2023.09.11.)

A MŰSZAKI KOMMUNIKÁCIÓ OKTATÁSÁNAK MŰLTJA, JELENE ÉS JÖVŐJE

PAST, PRESENT AND FUTURE OF TEACHING TECHNICAL COMMUNICATION

Bihari Zoltán, PhD egyetemi docens, Miskolci Egyetem

ABSTRACT

Drawing is the most ancient form of human communication. A figure or drawing carries much more information than words can express. Drawing is nothing more than an abstract system of symbols that contains many simplifications of reality. Machine drawing as a system of symbols is a specific means of communication in engineering society that helps to overcome the limitations of language. The aim of this paper is to present the methodology of teaching machine drawing in the past, the present and a possible future.

1. BEVEZETÉS

Az emberiség kommunikációjának legősibb formája a rajz. Kialakulása a beszéd létrejöttével azonos időszakra tehető, de jóval korábbi, mint az írásbeliségünk. Egy-egy ábra vagy rajz jóval több információt hordoz, mint azt szavakkal ki tudnánk fejezni. A rajz nem más, mint egy absztrakt jelrendszer, amely számos, a valósághoz képesti egyszerűsítést tartalmaz. Természetesen a korrekt megértés feltétele a jelrendszer ismerete valamennyi, kommunikációban részt vevő fél számára. Nem véletlen, hogy a laikus számára az 1. ábra szerinti azték kódex képelbeszélése két fiatal házasságáról nem értelmezhető.



1. ábra: Részlet egy azték kódexből [1]

Ebből kiindulva hiába vizsgáljuk valamely civilizáció kommunikációját (legyen az egyiptomi vagy távolkeleti), megfelelő jelkulcs nélkül nem jutunk sokra. Jelen világunkban a műszaki kommunikáció egy jelentős részét a rajzi ábrázolás fedi le, amely szintén egyezményes jelölések alapján létrehozott absztrakció, a valóság egyfajta egyszerűsített leképzése, amelyet a jelkulcs ismerői megértenek.

Szerencsére ezt a kódolást, szabályrendszert, a géprajzi szabályokat ISO jelöléssel ellátott nemzetközi szabványok rögzítik. A géprajz tehát nem más, mint a műszaki kommunikáció sajátos nyelve, melyet mérnökök milliói ismernek szerte a világon. „Írásbeli” formája a műszaki rajzok elkészítése. „Olvasási” része a mások által készített rajzok megértése. A szabályok ismerete egyaránt fontos a tervező, a gyártó, az üzemeltető, a karbantartó stb. szakemberek számára. A műszaki egyetemeknek és a műszaki középfokú oktatási intézményeknek az egyik legfontosabb feladata, hogy a szabályrendszer ismertetésével biztosítsa, hogy a jövőben is zökkenőmentesen valósuljon meg ez a kommunikáció.

2. A GÉPRAJZ OKTATÁS MŰLTJA

A műszaki ábrázolás tanításának pedagógiai módszertana lassú, de folyamatos változáson ment keresztül az elmúlt évtizedek során. Ennek a változásnak az egyes mérföldkövei nem minden esetben hoztak, hoznak pozitív változást, tudomásul kell venni, hogy az újítások hatásait minden esetben empirikus úton vizsgálni, értékelni kell, jóval azelőtt, hogy nagy plénum előtt hagynánk annak elterjedését.

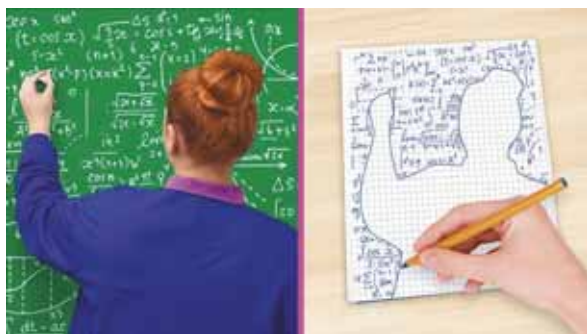
Azok a tárgyi eszközök, amelyek meghatározzák az oktatás színességét, változatosságát, alapvetően determinálják a géprajz tanítás módszereit. Bezzegh Zoltán és Ivánka László Tanári kézikönyvének 1974-es kiadásában ([2]) korunk modern szemléletével nézve egy „érdekes”, megmosolyogtató rész olvasható:

„...A falitábla ősi iskolai szerszám, s a célnak legjobban megfelelő formáját már régen kialakították. De sajnós mindig vannak újítók, akik a meglévő jót az újjal elrontják. Megmutatjuk ugyan az új alkotásokat, és a lélekűvének is hihetünk, akik szerint a nagy fekete felület nyomasztó hatással van a tanulókra, de ennek ellenére a szerszámaink alatt mozgó, s rendszerint kibírhatatlanul zörgő, zsinóron felle mozgatható táblákat, valamint a cement, üveg, műanyag felületű táblákat mi mégsem tudjuk használni. Nekünk a nagyméretű, fából készült, fénytelen, fekete táblalakkal bevont felület a legjobb...”

A műszaki ábrázolás tanításában sok oktatási intézmény évtizedekig megrekedt a frontális jellegű ún. SzTK (Szivacs – Tábla – Kréta) modellnél. E szerint az oktató a táblán felrajzolja az adott szerkezetet részletes magyarázattal kiegészítve, miközben elvárja a diákoktól, hogy a rajzot lerajzolják és a magyarázatot is lejegyzeteljék a füzetükbe.

Az egyetemi nagy előadóban az oktató viszonylag távol helyezkedik el az egymást nem, vagy csak felületesen ismerő hallgatóstól. A tantárgyi tematika alapvetően táblarajzokat igényel, így az oktató szabad mozgása is erősen korlátozott. Mindezek korábban nagyon megnehezítették a hallgatók aktív bevonását a tanórákba. Általánosan elmondható, hogy passzív hozzáállás jellemezte a diákokat, illetve csak az érdeklődőbb réteg próbálta a táblára krétával felkerült ábraanyagokat a füzetében megörökíteni.

Amikor 2015-ben a Géprajz tárgy előadója lettem, azonnal láttam, hogy gyökeres változtatásokra van szükség, szakítani kell a hagyományos SzTK modellel. A táblára rajzolt unalmas krétarajzok készítése során az előadásra koncentrálni észre sem veszi az előadó, hogy a tábla jelentős részét „széles vállalival” eltakarja a tudásszomjtól csillogó szemek elől.



2. ábra: Takarásban a tábla [3]

3. A JELEN

A 2000-es évekre a hordozható számítógépek, a prezentációk készítésének népszerűsödése, a képernyő tartalom kivetítésének technikai háttere egy új oktatástechnikai forradalmat indított el, nevezetesen a vizuális oktatás forradalmát. Cinizmus nélkül elmondható, hogy azokra az oktatókra, akik napjainkban használják ezen korszerű számítástechnikai eszközöket, mint a szakma csúcsára tekintünk. Pedig ez még messze nem a XXI. század oktatási eszközrendszerre. Bevallhatjuk őszintén, hogy egy prezentáció alapvetően nem a hallgatók, hanem az oktatók munkáját segíti. Sokkal kényelmesebb, szebb, színesebb, és csak egyszer kell elkészíteni. Ráadásul akár a tananyag többszöröse is leadható ugyanannyi idő alatt. A „leadható” szó az előző mondatból nagyon is idevaló, ugyanis azt sugallja, hogy az oktatótól elindult az információ, de egyáltalán nincs a jelentésében benne az, hogy megérkezik a befogadóhoz, a hallgatóhoz. Pedig valljuk be, ez lenne a kitűzött, elérendő cél.

A Géprajz tanítása során sok oktatási intézmény belesétált a Power Point csapdába. Nem jelenthetjük ki, hogy ennek a technikának nincs létjogosultsága, hiszen a színes ábrák érdekessé teszik az előadást, de ezen prezentációk igen gyakran az ún. „mozi effektus” hátrányát hordozzák magukban. A hallgató leül, és teljes passzivitásba süllyedve hallgatja és nézi a tananyagot – esetenként eszik, iszik, esetleg elalszik közben. A jegyzetelés az elhangzott gondolatok, kérdések papír alapú rögzítése – az órai aktivitás – teljesen eltűnik, a folyamatos figyelmet is nagyon nehéz fenntartani. Valójában magában minden diák abban reménykedik, hogy a prezentáció valamilyen formában majd a későbbiek során rendelkezésre fog állni. Ne felejtjük el azonban azt, hogy egy jó prezentáció csak vázlat, amely segít az előadónak az előadás fonalát vezetni. A közben elhangzott szóbeli (vagy szakirodalomban leírt) információ nélkül használhatatlan, és kevés a sikeres vizsga letételére. Másodsorban egy kész géprajzi ábra kivetítése nem elégséges a megértéshez. A rajz készítésének folyamata, valamint a közben elhangzó szóbeli közlés adja meg azt a többletet, amely használható tudás átadását jelentheti.

Némiképp javíthat a helyzeten, ha az oktató – végső elkeseredésében – előre odaadja a hallgatóknak a prezentációt, abban a reményben, hogy kinyomtatva hozzák magukkal az előadásra, és a szóban elhangzottakat a prezentáció vázlatpontjai közé jegyzetelik. Ez a meg-

oldás kényelmes a hallgatónak és kényelmes az oktatónak is. Itt már megjelenhet némi interaktivitás is a tanóra keretein belül. Nyilvánvalóan ezzel a módszerrel lehet a hallgatói elégedettség legnagyobb fokát elérni.



3. ábra: A figyelem fenntartása komoly nehézséget jelent a „Z” generációnál [3]

A Műszaki ábrázolás esetén azonban ez a módszer sem tekinthető ideálisnak. A finommotorika döntő fontosságú a gépészmérnök képzésben, amelynek kialakulása érdekében nem nélkülözhető az egyes géprajzi ábrák szabad kézzel történő rajzolása. Ezt a tudományterületet lehetetlen úgy elsajátítani, hogy hosszabb-rövidebb ideig szemléljük a kész ábrát. A tanulási folyamat alapvető része a konstrukció újra és újra történő ismételt lerajzolása. Igen lényeges, hogy a tanulók megtanulják a tananyagból megfelelően kiválasztani azon lényeges részeket, amelyek szintetizálása révén új, addig nem látott, nem begyakorolt konstrukció is létrehozható.

4. EGY LEHETSÉGES JÖVŐ

Egy átlagos intézményi költségvetést figyelembe véve, az elérhető technikai eszközök közül az általam leginkább megfelelőnek tartott, és jelenleg is alkalmazott innovatív elem ötvözi az SzTK módszert a korszerű IKT eszközökkel, így átrepíti a XXI. század oktatási technológiájába. Alkalmazása megkívánja mind az oktatótól, mind a hallgatótól a befektetett munkát és erőfeszítést, mégis látványos, interaktív, figyelmet folyamatosan fenntartható órátartást tesz lehetővé.

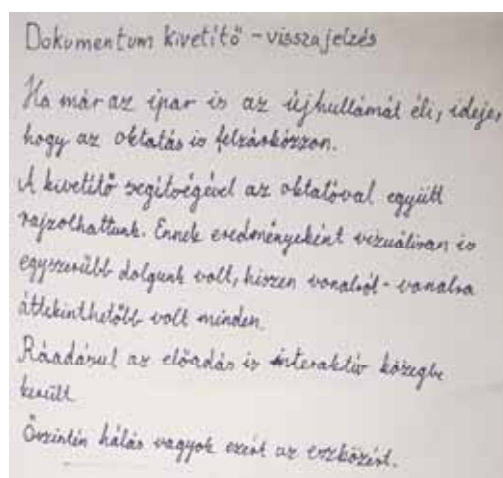
Az alkalmazott készülék nem más, mint egy állványra helyezett webkamera, amely képes a számítógépen keresztül a projektor segítségével a vetítőlapon vetíteni azt, ami éppen a papírra kerül.



4. ábra: AVer típusú dokumentum kivetítő alkalmazása [4]

Nagy előnye ennek a módszernek, hogy nem háttal, hanem a hallgatókkal szemben ülve helyezkedik el az oktató, így figyelemmel tudja kísérni a munkát, észreveszi a hallgatók visszajelzéseit. Színes tollal, ceruzával színes ábrákat készíthet a hallgatók szeme láttára. Másik nagy előnye, hogy az óráról készült papír alapú vázlat a későbbiek során is megtekinthető, ellenőrizhető. A kamera előtt zajló események (kép és hang) egyetlen kattintással filmre vehetők a készülék, valamint az alkalmazott szoftver segítségével, így tökéletesen dokumentálható a foglalkozás. Mivel a hallgatóság azt látja, hogy az oktató dolgozik (rajzol), így ők is ceruzát ragadnak, és próbálják követni az ábrák elkészítésének folyamatát.

Az ismertetett eszközháttér a távoktatási rendszerben is kiváló lehetőséget ad az órátartásra. Nincs más feladatunk, mint lerajzolni a készülék kamerája előtt a tananyag ábráit, magyarázatot fűzni hozzá, majd a kész videót megosztani a hallgatósággal.



5. ábra: Hallgatói vélemények

Több éven keresztül hallgatók sokaságának visszajelzését gyűjtöttük össze az alkalmazott módszer hasznosságáról. Önkényesen kiragadva egy ilyen véleményt mutat be a 5. ábra.

A bemutatott dokumentumvetítő alkalmazása mellett a diákok nagy lelkesedéssel fogadják azokat a 3D-s pdf formátumban elkészített ábrákat, amelyeket a számítógépük vagy a mobiltelefonjuk képernyőjén szabadon tudnak forgatni, nagyítani, szeletelni. Ez az egyéni, otthoni munkában igen jelentős segítséget nyújt.



6. ábra: 3D-s forgatható ábrák alkalmazása

Tapasztalat szerint azonban az IKT eszközök korántsem tudják pótolni a kézzel fogható, megtapintható alkatrészeket. A XXI. század technológiája lehetővé teszi, hogy ezek a testek valós formát öltsenek a 3D nyomtatók alkalmazásával. Ez egy olyan előny, amelyet ki nem aknázva szegényebb lenne az oktatás minősége. Ezzel a technológiával az oktatásba a látás és a hallás mellett egy újabb érzékszerv is bekapcsolható, nevezetesen a tapintás. Ennek hatékonyságnövelő hatása nem kétséges.



7. ábra: 3D nyomtatott demonstrációs eszközök

A Miskolci Egyetemen működő Prototípusgyártók Öntevékeny Köre diákkör jóvoltá-

ból pályázati, valamint céges kapcsolati forrásból számos szerkezet, valamint szerkezeti elem elkészült, amelyeket rendszeresen az oktatás szolgálatába állítva javítható a térlátás, az oktatás hatékonysága, csökken a hallgatók lemorzsolódása.

5. ÖSSZEGZÉS

Az oktatás ars poetikája az, – annak kell lennie – hogy ha már az oktatásba időt, energiát fektetünk, a munkánk minél hatékonyabb legyen. A hatékonyság növelése érdekében pedig bármilyen eszköz bevethető. [5] szerint a tanulási piramis csúcsán a frontális előadás áll, de a hatékonysága csupán 5%. Ez azt jelenti, hogy egy 45 perces órán, folyamatos beszéd során elhangzottakból átlagosan kevesebb mint 3 pernyi információ rögzül a hallgatóságban.



8. ábra: Tanulás-piramis [5]

A jó hír azonban számunkra, oktatók, tanárok számára az, hogy a kutatás szerint a tanulási folyamat leghatékonyabb módja a mi fő tevékenységünk, nevezetesen mások tanítása.

IRODALOM

- [1] www.arcanum.com/hu/online-kiadvanyok/pannon-pannon-enciklopedia-1/magyar-nyelv-es-irodalom-31D6/anyelvhasznalaterdesei-383D/iras-helyesiras-keszler-borbala-39A8/az-iras-fejlolese-39AB/
- [2] Z. BEZZEGH, L. IVÁNKA: Tanári kézikönyv a műszaki rajz tanításához, a gép és villamosipari, valamint az építőipari szakközépiskolások I. osztályaiban, Tankönyvkiadó, 1974.
- [3] Z. BIHARI: Portfólió 100 p. Közlemény:31786803, Tudományos, 2020
- [4] <https://www.averusa.com/education/support/u70>
- [5] BETHEL: National Training Laboratories, Maine

KÖRFORGÁSOS GYÁRTÁSHOZ IGAZODÓ TERVEZÉSI MÓDSZER FEJLESZTÉSE

DEVELOPMENT OF A DESIGN METHOD FOR CIRCULAR MANUFACTURING

*Borsodi Eszter, PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet
Dr. Takács Ágnes, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet*

ABSTRACT. The article presents the concept of the circular economy and the main guidelines of the circular design. We compared existing circular product design methodologies and developed a new one based on the weak points of the previous researches. The proposed method focuses on a process-based approach, the design process and the influence of the decisions made in each step.

1. BEVEZETÉS

Napjaink megoldandó problémáinak nagy része a klíma- és környezetvédelem témaköréhez kapcsolódik. Az Európai Unió szabályozások megalkotásánál is a fenntarthatóság, és a lineáris gazdaságról körforgásos gazdaságra való átállás ösztönzése az egyik fő irányelv. A körforgásos gazdaság egy rendszer alapú modell, melynek célja a termékek környezetre gyakorolt negatív hatásainak minimalizálása a teljes életciklusuk során, az értékvesztés csökkentése az erőforrások zárt körben történő keringtetésével, és az elsődleges nyersanyagok felhasználásának minimalizálása. Az újrahasználat, a javítás, az újragyártás, a felújítás és az újrahasznosítás optimalizálja a termék életciklusát és javítja az erőforrások felhasználását.

Ahhoz, hogy egy termék a lehető legjobban illeszkedjen a körforgásos gazdaságba már a tervezésnél is számításba kell vennünk rengeteg szempontot. Előzetes kutatásaink szerint bár léteznek körforgásos tervezési módszerek, ezek nagy része csak elméleti, nem alkalmazták még valós termékekre, túl bonyolultak – így kérdéses, hogy a profitorientált versenyszférában mennyire hasznosak – és a sikerességüket illetően nem igazán vannak indikátorok. Általában egy területre fókuszálnak, hiányzik belőlük a holisztikus szemlélet és a meglévő rendszerekkel ill. infrastruktúrával való kompatibilitás.

Célunk egy komplex, mégis átlátható, a gyakorlatban könnyen alkalmazható tervezési

módszer fejlesztése, amely a körforgásos gazdaság minden aspektusát lefedi.

2. A KÖRFORGÁSOS GAZDASÁG FO-GALMA

Napjainkat a fogyasztói társadalom és a túlfogyasztás jellemzi, ami táplálja az új és továbbfejlesztett termékek iránti keresletet. A lineáris gazdasági szerkezet a termékre, annak előállítására és értékesítésére fókuszál, arra nem, hogy mi történik a termékekkel az életciklusuk végén. A tervezés során hagyományosan nem veszik figyelembe a termék környezetre gyakorolt hatását annak gyártása és használata közben, sem azt, hogy az elhasználódása, meghibásodása esetén mi történik vele. A termékek nagy részét nem tartósságra tervezik, egyes tartós fogyasztási cikkeknel még tervezett elavulást is beépítenek. Továbbá a folyamatos technológiai fejlődés is az új modellek megjelenését és az újbóli vásárlást ösztönzi.

Ez a modell azonban nagy mértékű erőforrás-felhasználáshoz és pazarláshoz vezet, a termékek nagy része újrahasznosítás, újrafelhasználás, vagy újrahasználat nélkül egyszerűen hulladéklerakókba kerül, szennyezve a környezetet, elpazarolva az előállításához szükséges óriási anyag-, energia-, víz- és munkaerő szükségletet.

2021 februárjában az Európai Parlament körforgásos gazdaságra vonatkozó cselekvési tervet fogadott el a szén-dioxid-mentes, környezeti szempontból fenntartható, mérgező anyagoktól mentes és teljesen körforgásos gazdaság 2050-ig történő megvalósítása érdekében. Az Európai Bizottság 2022 márciusában ezen cselekvési terv részeként közzétette az első intézkedéscsomagot, a javaslatok között szerepel például a fenntartható termékek népszerűsítése vagy a fogyasztók ösztönzése a zöld átálláshoz. [1]

A körforgásos gazdaságban (1. ábra) a termékközpontú fókusz helyett a rendszer alapú tervezési megközelítés kerül előtérbe. A körforgásos gyártáshoz igazodó tervezés során egy

olyan termék vagy szolgáltatás születik, amely funkcióját betölti, az optimális anyagválasztás mellett a legjobb teljesítményt nyújtja, miközben minimálisra csökkentjük a környezetre gyakorolt negatív hatásait a teljes életciklusa során és egyszerűvé tesszük az újrafeldolgozását. A körforgásos tervezés középpontjában a termékekben és anyagokban beágyazott értékvesztés

visszaszorítása áll azáltal, hogy egy zárt körben keringtetjük őket. Bizonyos megoldások, mint például az újrahasználat, vagy a javítás meghosszabbítják a termék életciklusát, míg a felújítás, vagy az újrahasznosítás javítja az erőforrások kihasználását. A körforgásos gazdaság ezeknek a stratégiáknak a kombinációját alkalmazza. [2]



1. ábra. A körforgásos gazdaság modellje [1]

3. LÉTEZŐ KÖRFORGÁSOS TERVEZÉSI MÓDSZEREK ELEMZÉSE

Több körforgásos tervezési módszer létezik. A Delfti Műszaki Egyetem Products That Last projektje [3] a körforgásos gazdaság új üzleti lehetőségeinek, modelljeinek és tervezési stratégiáinak felfedezésére összpontosított. A kutatás alapján hat stratégiát azonosítottak, amelyek mint fő irány határozzák meg a tervezést:

1. **A termékhez való ragaszkodáson és bizalom kialakításán alapuló tervezés:** olyan tartós termékeket hoz létre, amelyeket az emberek szeretni fognak és megbíznak benne.
2. **Tartósságra való tervezés:** kopásálló termékeket hoz létre, ahol az anyagválasztás döntő fontosságú.
3. **Standardizálás és kompatibilitás alapú tervezés:** a termék részeit más termékekkel kompatibilisnek tervezi, cél a multifunkcionalitás és a modularitás.
4. **Könnyű karbantartásra és javításra tervezés:** a termék hosszú működőképes állapotának fenntartására irányul, hogy ne okozzon kihívást a törött alkatrészek javítása és cseréje.

5. **Bővíthetőségre és alkalmazkodóképességre való tervezés:** hosszú ideig fenntartja a termék használhatóságát azáltal, hogy a frissíthetőség, bővíthetőség révén növeli az értékét és teljesítményét, továbbá a változó felhasználói igényekhez való igazodást is biztosítja.

6. **Szét- és összeszerelésre irányuló tervezés:** a termékeket és alkatrészeit úgy tervezik, hogy végül könnyen szétbontandók és összeszerelhetők legyenek, segítve ezzel a felújításukat és javításukat.

Az alábbiakból jól látható, hogy a termékek iránti fogyasztói elkötelezettség rendkívül fontos eleme a körforgásos modellnek és a körforgásos gyártáshoz igazodó tervezésnek, ennek növelését segíti a termékek testreszabása, az egyéni igények figyelembevételével [4].

Egy másik megközelítés az RSA (The Royal Society for the Encouragement of Arts, Manufactures and Commerce) Circular Network modellje [5], amely a termék életciklusa során résztvevő érdekelt felekere fókuszál.

A The Great Recovery kutatás [6] –amelyet szintén az RSA végzett– a Products That Last-hoz hasonlóan négy szempontot

azonosított, mint a körforgásos gyártáshoz igazodó tervezés fő irányelvei:

1. hosszú élettartamra való tervezés,
2. lízingre vagy szolgáltatásra történő tervezés,
3. a gyártásban újrafelhasználhatóságra tervezés,
4. az anyagvisszanyerésre való tervezés.

Az élelciklus-értékelés (LCA, Life Cycle Assessment) [7] és a bölcsőtől a bölcsőig (C2C, Cradle to Cradle) [8] szemlélet csak részben tartalmazza a körkörösséget, és nem foglalja magába az anyag kritikusságát. Az élelciklus elemzés értékeli a termék vagy szolgáltatás környezetre gyakorolt hatásait a teljes élelciklusa során (nyersanyag kinyerése, feldolgozása, gyártás, értékesítés, használat), míg a bölcsőtől a bölcsőig rendszerszemlélet egy biológiai anyagciklusként írja le a terméket és annak előállítását, célja az ökológiai szempontból optimális és hulladékmentes termelés.

Fifield és Medkova [2] egy olyan körforgásos gazdasághoz igazodó tervezési koncepciót hoztak létre, ami igyekszik kombinálni az előzőekben felsorolt elveket, ezért az alábbi elemeket tartalmazza:

- körforgásos terméktervezési stratégiák,
- új üzleti modellek,
- szerepelteti az érdekelt feleket az interdiszciplináris ismeretek vonatkozásában,
- a korábbiakat kiegészíti a rendszerfeltételek (pl.: jogszabályok, infrastruktúra) elemmel.

Ezeket a változtatások fő eszköze, az újratervezés (redesign) köré csoportosítja, ami úgy történik, hogy négy irányvonalra (rendszerben gondolkodás, tudatosság, gondolkodás megváltozása és kommunikáció) összpontosít a négy elem körül. Figyelembe veszi továbbá az emberek, a bolygó és a profit dimenziókat is, amelyek mindegyike irányítja és befolyásolja a körforgásos gazdaság újratervezési folyamatait. Ezek a dimenziók szimbiotikusak, mivel az egyik megváltoztatása közvetlen hatással van a másik két dimenzióra.

Egy másik kutatásban [9] egy gyakorlatiasabb megközelítést dolgoztak ki, és a körforgásos gazdasághoz igazodó tervezés megoldását a több élelciklusra való tervezésben látták. A több élelciklusra való tervezés az előre meghatározott élelciklus definícióját javasolja, amely magában foglalja a termékek gyártását, értékesítését, használatát, visszaküldését, újragyártását majd ennek

a ciklusnak az újratekésítését. Ebben a megközelítésben a termék teljes élettartama egy előre meghatározott (idő vagy teljesítmény alapú) periódus szerint fel van osztva több részélettartamra. Minden részélettartam után a termék visszakérül a gyártóhoz az eredeti teljesítményspecifikációk vagy új specifikációk szerinti újragyártásra [10].

Asif és munkatársai [9] az említett kutatásban megállapították, hogy erős szinergia van a terméktervezési stratégiai irányok, a termék elavulásának módjai és a termékélelciklus végi lehetséges döntések között. Ezt a szinergiát alapul véve, valamint a modularitással kiegészítve fejlesztették ki a saját módszerüket. A modularitás tekintetében a Moduláris Funkció Kibontást (Modular Function Deployment, MFD) vették alapul. Az öt lépésből álló MFD módszer segítségével moduláris egységekre bontottak egy professzionális mosodai mosógépet. Az MFD folyamat több, egymással összekapcsolt mátrix kifejlesztését foglalja magába, ahol az egyik mátrix eredményeit a következő mátrixba táplálják be [11].

A szakirodalmi kutatás alapján az alábbi közös jellemzőket azonosítottuk a már létező tervezési módszerek között, mint fő irányelvek a körforgásos gazdasághoz igazodó tervezésben:

- rendszerekben való gondolkodás,
- a termék teljes élelciklusának figyelembevétele,
- fókuszban a hosszú termék élettartam,
- erőforrás-hatékonyság,
- regeneratív megközelítés (főleg kritikus nyersanyagok szempontjából),
- az anyagválasztás fontossága,
- az elsődleges nyersanyagok felhasználásának minimalizálására való törekvés,
- érték- és erőforrás megőrzés,
- a hulladék és a negatív környezeti hatások csökkentése, fenntarthatóság,
- könnyű szét- és összeszerelhetőségre való törekvés,
- könnyű javításra és/vagy karbantartásra való törekvés,
- együttműködés az érdekelt felek között,
- a tervezési döntések társadalmi hatásainak figyelembevétele,
- üzleti modell innováció,
- iteratív és adaptív tervezési folyamat.

A körforgásos tervezési módszerek leginkább abban különböznek, hogy az alábbi négy nagy terület szerint csoportosítható elemek közül mire fókuszálnak:

1. táblázat. Létező tervezési módszerek közötti különbségek

Lépték	Cél
<ul style="list-style-type: none"> • Termék • Vállalat • Politikai irányelv • Iparág • Ágazat • Nemzetgazdaság • Regionális gazdaság 	<ul style="list-style-type: none"> • Anyag körforgása • Tartósság, kopásállóság • Könnyű javíthatóság • Újrahasznosíthatóság • Újrahasználhatóság • Kompatibilitás és modularitás • Felújíthatóság • Újragyárthatóság • Nagy teljesítmény • Könnyű összeszerelhetőség • Fogyasztói igényekhez való alkalmazkodóképesség • Érzelmi érték • Üzleti modell innováció • Társadalmi szempontok • Környezet regenerációja • Az előírások, jogszabályok betartása
Érdekeltek felek	Implementáció szintje
<ul style="list-style-type: none"> • Gyártók • Márkák, cégek • Nyersanyag beszállítók • Döntéshozók • Fogyasztók • Hulladékgazdálkodási szervezetek • Logisztika • Kutatók • Oktatási intézmények • Tervezők 	<ul style="list-style-type: none"> • Elméleti módszerek • Valós termékre alkalmazott módszerek

Megállapításaink a már meglévő körforgásos tervezési módszerekről a következők szerint foglalható össze:

- legtöbbjük csak elméleti, soha nem valósult meg,
- nem tesztelték létező termékeken,
- bonyolultak és nehezen kivitelezhetők,
- hiányzik belőlük a gyakorlatiasság.

A való életben egy cég működésében az idő rendkívül fontos tényező, a túl komplex és időigényes módszerek használata emiatt kerülendő.

A korábbi modellek a műszaki megoldásokra helyezik a hangsúlyt, de a körforgásos gazdaság holisztikusabb megközelítést igényel, beleértve mindent, ami a tervezéshez kapcsolódik. Általában egy területre fókuszálnak, hiányzik belőlük a komplexitás valamint a meglévő rendszerekkel és infrastruktúrával való

kompatibilitás, ami a körforgásos gazdaság kulcsfontosságú jellemzője. A mérnökök megfelelő oktatása és az érdekelt felek bevonása nélkül ez a paradigmaváltás nem következhet be gyorsan.

Csak néhány mérőszám és mutató áll rendelkezésre a módszerek sikerességének mérésére, legtöbbjük esetében nincs semmilyen mérési vagy visszacsatolási lehetőség. Ezért célunk egy komplex, de mégis egyszerű és a valóságban könnyen alkalmazható modell létrehozása volt, amely a körforgásos gazdaság minden aspektusát lefedi.

4. KÖRFORGÁSOS TERVEZÉSI MÓDSZER FEJLESZTÉSE

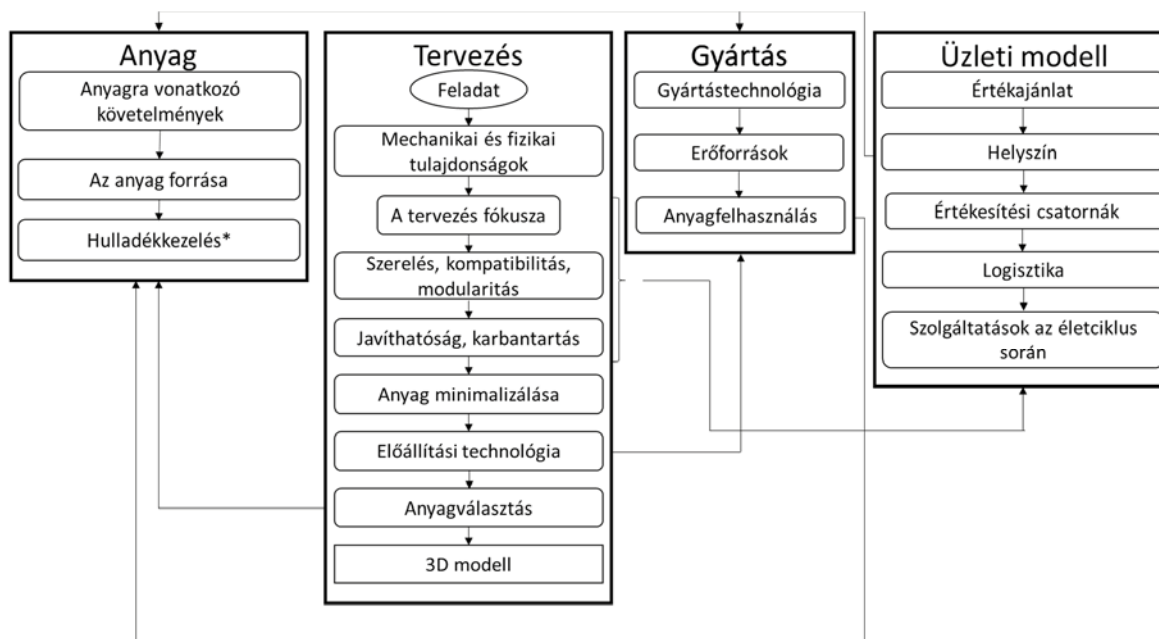
A szakirodalomban megismert körforgásos gyártáshoz igazodó tervezési módszerek hibáinak és hiányosságainak kiküszöbölésére

törekedtünk a javasolt módszer megalkotásánál, amit a 2. ábra szemléltet.

A tervezés folyamatára három kisebb döntési modulnak, az *anyag*nak, a *gyártás*nak és az *üzleti modell*nek van hatása. Ezek az ábrán nyíllakkal jelölt módon nemcsak a tervezéshez, hanem egymáshoz is kapcsolódnak. A folyamat egyes alrészeiben és elemeiben meghozott döntések mindegyikénél a körforgásos gazdasághoz való igazodást, és a modulok egymásra való hatását kell szem előtt tartani.

A tervezési feladat pontos kijelölése meghatározza a termék mechanikai tulajdonságait és

fizikai megjelenésének alapjait. A következő lépés, a tervezés fókusza jelen esetben azt jelenti, hogy a körforgásos gyártáshoz igazodva milyen fő elv(ek) mentén történjenek a tervezés következő lépései (pl.: könnyű javíthatóság vagy nagyon hosszú élettartam a cél). Az itt meghozott döntések közvetlenül hatnak a szét- és összeszerelhetőségre, más termékekkel, kiegészítőkkel, alkatrészekkel és a csomagolással való kompatibilitásra, a moduláris felépítés kérdésére, illetve a javíthatóság, és a karbantartás módjára.



*A termékéletciklus végén és a gyártás közben

2. ábra. A javasolt körforgásos tervezési módszer

A tervezés fókusza, a szerelhetőség, és a karbantarthatóság hármasa nagy mértékben kihat az *üzleti modell*re. A körforgásos gazdasághoz igazodó tervezés új üzleti modelleket kíván, és azt, hogy a fogyasztó és a gyártó közötti kapcsolat az értékesítés után ne szűnjön meg, hanem a termék teljes életciklusán át, egészen annak végéig megmaradjon. Az értékajánlat meghatározásánál figyelembe kell venni, hogy a termék finanszírozója, a vásárlói döntés meghozója és a termék használója nem feltétlenül esik egybe. Az értékajánlat magában foglal mindent, amit a gyártó kínál, ez a termék mellett a különböző szolgáltatásokat (pl.: üres csomagolás visszavétele, kiterjedt szervizhálózat) is tartalmazza a teljes termékéletciklus mentén. Az *üzleti modell*ben a helyszín jelöli az előállítás és a disztribúció helyszínét és a megcélzandó piacot (potenciális fogyasztók köre, B2B–Business-to-Business;

B2C–Business-to-Consumer; B2G–Business-to-Government) is. A helyszínen keresztül így az *üzleti modell* hatással van a *gyártás* döntési modulra, illetve az *anyag* modulra is. Ez a hatás az *anyag* modulra főleg az anyagigényes termékek esetén lehet kulcskérdés: ha körforgásos módon, és a lehető legkisebb környezetkárosító hatással szeretnénk egy terméket létrehozni, akkor fontossá válik a nyersanyagok és az alkatrészek beszerzési helye is (pl.: minél rövidebb szállítási út, a beszállítók is körforgásos módon működjenek). A helyszín meghatározza az értékesítési csatornákat és a logisztikai megoldásokat is. Mindezen elemek összességében hatnak a termék életciklusa során nyújtott szolgáltatásokra (pl.: rendszeres karbantartási szolgáltatás, tönkrement alkatrész cseréje, garancia, bővíthetőség vagy frissítés lehetősége, elhasznált termék visszavétele az életciklusa végén).

A *tervezés* főmodul következő eleme az anyag minimalizálása, ezáltal a hulladék csökkentése. Ezt követi a gyártási technológia kiválasztása a korábbi döntések figyelembevételével. A *gyártás* modulra a korábban említett módon hatása van az *üzleti modell* helyszín elemének. Az előállítási technológia meghatározásánál szem előtt kell tartani az erőforrásigényt (minél kisebb erőforrásigény az erőforrás-felhasználás csökkentése, és az értékmegőrzés miatt). Ezután következhet a gyártástechnológiához igazodóan az anyagfelhasználás kérdése. Ez az elem szoros kapcsolatban áll az *anyag* modullal.

Az *anyag* modulban az első döntéseket az anyaggal szemben támasztott követelmények tekintetében kell meghozni, majd az anyag forrását kijelölni (ami az előzőekben említett módon kapcsolatban áll az *üzleti modell* helyszín elemével). A körforgásosság miatt a hulladékkezelés is kiemelt fontosságúvá válik. A hulladékkezelés kapcsán foglalkozni kell a termékéletciklus végén, és a gyártás során keletkező hulladék sorsával is (pl.: újrafeldolgozás, újrahasznosítás, deponálás, ártalmatlanítás kérdése). Az *anyag* modul természetesen szoros kapcsolatban áll a *tervezés* főmodul anyagválasztás elemével is.

Ezek meghatározása után a termék 3D modell képében virtuális formát ölt. Természetesen ezek a lépések iteratív módon, folyamatos visszacsatolás-javítás során történnek.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az előzőekben bemutatásra kerültek a körforgásos gazdaság fogalma, és a körforgásos gazdasághoz igazodó tervezés fő irányelvei. Összehasonlítottuk a már létező körforgásos terméktervezési módszereket, feltártuk a közös pontjaikat, és a gyengeségeiket alapul véve új módszertani megközelítést javasoltunk. A javasolt módszer folyamatelvű megközelítés, a tervezési folyamat és az egyes lépésekben meghozott döntések egymásra hatása áll a középpontjában, melyeket a gyakorlatban a körforgásos szemlélet tükrében kell meghozni.

A kutatás folytatása lehet a kidolgozott módszer gyakorlatban való alkalmazásának vizsgálata egy valós termék esetében, illetve a validációt követően a módszer sikerességét mérő indikátorrendszer megalkotása.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Acknowledgement to the project CIRCLETECH (101079354) funded by the Horizon Europe programme of the European Commission.

(Köszönet az Európai Bizottság Horizont Europe programja által finanszírozott CIRCLE-TECH (101079354) projektnek.)

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] European Parliament (2023). Circular economy: definition, importance and benefits. On-line hivatkozás, www.europarl.europa.eu. Letöltve: 2023. 09. 15
- [2] Fifield, B., Medkova, K. (2016). Circular Design - Design for Circular Economy. Lahti CleanTech Annual Review, Lahti University of Applied Sciences
- [3] Bakker, CA., den Hollander, MC., van Hinte, E., Zijlstra, Y. (2014). Products that last: Product design for circular business models. TU Delft Library.
- [4] Trautmann, L.; Piros, A.; Botzheim, J. (2020). Application of the Fuzzy System for an Emotional Pattern Generator. Appl. Sci., 10(19), 6930. <https://doi.org/10.3390/app10196930>
- [5] RSA (2013). Investigating the Role of Design in the Circular Economy. Report 01: June 2013
- [6] RSA (2014). Designing for a circular economy: Lessons from The Great Recovery 2012-2016.
- [7] Muralikrishna, I., V., Manickam, V. (2017). Chapter Five - Life Cycle Assessment. Environmental Management, 57-75., Butterworth-Heinemann Books. ISBN 9780128119891
- [8] McDonough, W., M. Braungart (2010). Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things. Macmillan Publishers, ISBN 9781429973847
- [9] Asif, F.M.A., Roci, M., Lieder, M., Rashid, R., Mihelič, A., Kotnik, S. (2021). A methodological approach to design products for multiple lifecycles in the context of circular manufacturing systems. Journal of Cleaner Production, Volume 296, 126534, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126534>
- [10] Rashid, A., Asif, F.M.A., Krajnik, P., Nicolescu, C.M. (2013). Resource conservative manufacturing: an essential change in business and technology paradigm for sustainable manufacturing. Journal of Cleaner Production, Volume 57. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.012>.
- [11] Erixon, G. (1998). Modular Function Deployment - A Method for Product Modularisation. KTH Royal Institute of Technology.

SZÉN-ALAPÚ VEZETŐKÉPES SZERKEZETI KOMPOZITOK GYÁRTÁSA ÉS TULAJDONSÁGAINAK ELEMZÉSE

MANUFACTURING OF CARBON-BASED CONDUCTIVE STRUCTURAL COMPOSITES AND ANALYSING THEIR PROPERTIES

*Csvila Péter¹, PhD hallgató, csvilap@pt.bme.hu
Czigány Tibor^{1,2}, egyetemi tanár, czigany@eik.bme.hu*

¹*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék*

²*HUN-REN-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport*

ABSTRACT

This paper introduces nanoparticles, which can be used for advanced composite materials. We introduce their role and their engineering applications, and describes the properties of commercially easily available carbon-based nanoparticles and a widely used production method of composites reinforced with these particles, vacuum assisted resin infusion molding. We also investigate the effects of carbon nanotubes, graphite and carbon black on the conductivity of carbon fiber–reinforced structural composites.

1. BEVEZETÉS

A műszaki életben kompozitnak nevezzük az olyan anyagokat, amelyek nagy szilárdságú erősítőanyagból és egy azt befoglaló nagy szívósságú mátrix anyagból állnak, amelyek között kiváló adhéziós kapcsolat van. Az ilyen rendszerekben az erősítőanyagok jellemzően szálas anyagokból állnak (például üvegszál, szénszál), amelyekből előállított kompozit elemekre jellemző, hogy azok anizotrop, azaz irányfüggő tulajdonságokkal rendelkeznek. Ezt az irányfüggést elsősorban mechanikai tervezésnél alkalmazzák tudatosan, amely által kisebb tömegű és térfogatú alkatrészeket tudnak létrehozni. Azonban a kompozitok anizotrop viselkedése megjelenhet más fizikai tulajdonságokban is, mint például kitüntetett irányokban jobb hő-, vagy elektromosáram vezetés [1, 2].

A kompozitiparban szálformájú erősítés mellett egyre inkább megjelennek a nanorészecskék is. Nanorészecskékről akkor beszélhetünk, ha egy adott részecske legalább egyik dimenziója a nanométeres nagyságrendbe esik. Polimertechnikában ilyen részecskéket előszeretettel alkalmaznak valamilyen fizikai tulajdonság elérésének, javításának érdekében. Ilyen például a gumiabroncsok gyártása során

alkalmazott korom. Korom alkalmazása esetén a szén-alapú részecskéket elasztomerekhez adagolva jobb mechanikai tulajdonságot és kopásállóságot lehet elérni, továbbá még a kialakított rendszer is stabilabb lesz. De előszeretettel alkalmaznak napjainkban nanorészecskéket égésgátlásra is, amely által biztonságosabb polimer termékeket tudnak előállítani [3].

Nanorészecskéket a szálerősítésű kompozitokban is előszeretettel alkalmaznak egy-egy tulajdonság javításának érdekében. Az ilyen anyagokat hibrid kompozitoknak nevezzük, ugyanis az erősítő anyag mellett a nanorészecskék által így egy másik szilárd fázis is megjelenik, amely további előnyös tulajdonságokat biztosít a kompozit termék számára. A kompozitoknál az egyik leggyakrabban alkalmazott erősítőanyag a szénszál, köszönhetően kedvező mechanikai tulajdonságainak, mint például a nagy szilárdság és rugalmassági modulus. A szén alapvetően igen jó hő- és elektromosáram-vezető képességekkel rendelkezik, azonban így is nagyságrendekkel elmarad a különféle fémek vezetőképességeitől, mint például a réz vagy az alumínium. A kompozitokban alkalmazva a szénszálak vezetőképességét korlátozza a mátrix anyag szigetelő hatása is [1, 2, 4].

Az elektromosáram-vezetőképesség szénszálak kompozitokban növelhető nanorészecskék tudatos alkalmazásával. Ilyen nanorészecskék lehetnek a különféle szén-alapú részecskék, mint például a szén nanocsövek, grafén, vagy a különféle fém-oxid alapú részecskék is, mint például a titán-dioxid (TiO₂), vagy a mangán-dioxid (MnO₂). Már kis tömegszázalékú adalékolás esetén is beszélhetünk jelentős vezetőképesség növekedésről. Ezenfelül megfigyelhető egy úgynevezett perkolációs jelenség is, amely során kompozitban alkalmazott vezetőképességet növelő nanorészecskék esetén

egy bizonyos tömegszázalék alkalmazásakor ugrásszerű javulás tapasztalható a vezetőképesség terén. Nanokompozitoknál igen nagy problémát jelent a nanorészecskék egyenletes eloszlása, ugyanis a nanorészecskék nagy fajlagos felületüknek köszönhetően igen hajlamosak aggregálódni, amely által nem tervezett inhomogenitások alakulnak ki az anyagban. Erre megoldást nyújthat a megfelelő elkeverés, illetve a nagy nyírósebességgel való gyártás [5, 6].

A vezetőképes kompozitokat alkalmazhatjuk többek között az űrparban, a járműiparban és a különféle szenzorokban is. A vezetőképes szerkezeti kompozitok kedvező tulajdonsága, hogy multifunkcionalitásuknak köszönhetően a mechanikai terhelések elviselése mellett még legalább egy feladatot, a hő-, és/vagy elektromosáram vezetést ellátják egy anyagban. Ez által további tömeg, illetve térfogatcsökkentést elérve a különféle szerkezeteknél [5, 7].

Jelen munka célja olyan hibrid nanokompozit előállítás, amely a vezetőképessége mellett jó mechanikai tulajdonságokkal is rendelkezik és így alkalmazható szerkezeti elemként.

2. SZÉN-ALAPÚ VEZETŐKÉPES NANOKOMPOZITOK ÉS ELŐÁLLÍTÁSUK

Ebben a fejezetben bemutatásra kerülnek polimer-és kompozitparban gyakran előforduló szén-alapú anyagok. Továbbá ismertetjük az általunk gyártott szén-alapú nanorészecskékkel ellátott kompozitokat.

2.1. Műanyag- és kompozitparban alkalmazott szén-alapú anyagok

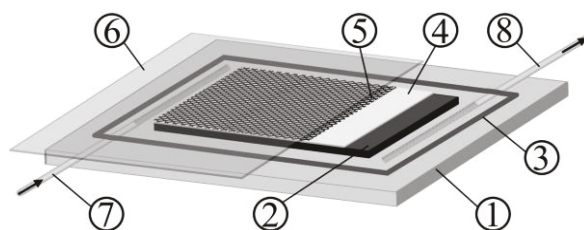
A vezetőképesség (G) mértékegysége az [S/m], amely dimenzió a fajlagos ellenállás reciproka és megadja az anyagok vezetőképességét, amely által leírható, hogy milyen mértékben tudnak egyes anyagok elektromosáramot továbbítani. A legjobban vezető szén-alapú anyag a grafén, amely egy egysíkból álló, csak szén atomot tartalmazó nanorészecske, vezetőképessége akár a 10^8 [S/m] nagyságrendet is elérheti. Még igen jó vezetőképességgel rendelkeznek a szén nanocsövek, amelyek típusuktól függően akár a 10^6 - 10^7 [S/m] értéket is elérhetik. A grafit szintén jó vezetőképességekkel rendelkező anyag, vezetőképessége akár a 10^5 - 10^6 [S/m] nagyságrendbe is eshet. A kompozitparban használt szénszálak vezetőképessége általában 10^4 [S/m] nagyságrendben esik, amelynek oka a rendezetlenebb szerkezet és a bennük található hibahelyek, azonban ez az érték nagyban függ a szénszálak gyártási tulajdonságaitól. A korom egy amorf, szénatomokból felépülő anyag, amely rendezetlensége miatt 10^1 - 10^4 [S/m] vezetőképességgel rendelkezik [8, 9, 10].

Vezetőképes kompozitok fejlesztése során a minél nagyobb fajlagos felületek elérésére a cél, amely elérésére a nanorészecskék megoldást kínálnak. Továbbá megfelelő mennyiségű nanorészecskék alkalmazásával képesek vagyunk egy összefüggő rendszert kialakítani a kompozitok mátrix anyagában, amellyel tovább növelhető a kompozit vezetőképessége [8, 9].

Ilyen szerkezeti kompozitokat előnyösen alkalmazhatunk például az űr-, vagy repülőgépiparban. Jelenleg a repülőgépek külső burkolatai, szárnyai a kompozitok kedvező fajlagos mechanikai tulajdonságai miatt főként polimer kompozitból készülnek. Azonban mivel a polimerek nem jó elektromosáram vezetők, ezért villámcsapás esetén lokálisan rongálódni tudnak a szerkezeti elemek. Erre például megfelelő megoldás lenne, ha a repülőgép külső kompozit elemei elektromos töltések vezetésére alkalmasak lennének, amely által a villámcsapás által keletkező kár csökkenthető lenne [11].

2.2. Próbatetek anyagai és gyártása

Munkánkban a kompozitparban elterjedt vákuum infúziós eljárást alkalmaztuk, annak jó reprodukálhatósága miatt. A gyártás elrendezését az 1. ábra szemlélteti. A szerszámra szárazon egymással párhuzamosan, egyirányban erősített 6 réteg Zoltek™ PX35 UD300 szövetet (UD) helyeztünk, amely 300 g/m^2 -es területi sűrűséggel rendelkezett. Ezután felépítettük a vákuum megtartására szolgáló rendszert. A kompozit próbateteket felépítő mátrix anyag Epikote resin MGS RIMR426 epoxigyanta és hozzá 100:26 tömegarányban kevert Epikure curing agent MGS RIMH433 térhálósító volt.



1. ábra. Kompozitok gyártására alkalmazott vákuum infúziós eljárás elrendezése, ahol 1: üveg szerszám, 2: szénszövet, 3: vákuum tömítőszalag, 4: letépzőszövet, 5: gyantavezető háló, 6: PET fólia, 7: gyanta bevezetés, 8: vákuumkivezetés

A vezetőképesség javítását szolgáló, külön-külön epoxi mátrixban elkevert nanorészecskék a következők voltak: többfalú szén nanocső (CNT), grafit és korom. A szén nanocsövek Baytubes C 150 P többfalú szén nanocsövek voltak, amelyek 3-15 falból épültek fel, külső átmérőjük 13-16 nm, belső átmérőjük 4 nm és hosszuk 1-10 μm volt. A felhasznált grafit Synthetic Grafit Cond 8 96 volt,

amely aggregátumok alapszemcsemérete 6,4 μm volt. A felhasznált korom Ketjenblack EC-300J volt, amely 30-50 nm méretű alaprészcsekkéből épült fel.

A nanorészecskéket tömegszázalékosan (m%) a tiszta epoxigyanta mátrixban (EP) minden gyártás kezdete előtt Bandelin Sonopuls 4200 HD ultrahangos homogenizálóban egyenletesre kevertünk 20 kHz-en, 100 W-os teljesítményen, 3 percen keresztül. A homogenizálás során a nanorészecskék egyenletesen eloszlottak, valamint az aggregátumok felbomlottak apróbb részecskékre. Majd az így kapott gyantához hozzáadtuk a térhálósító komponenst és bejuttattuk a rétegek közé, illetve öntőformában kiöntöttük azokat.

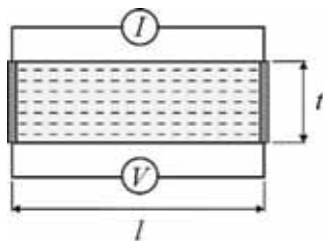
Az így kapott termékből 250x150 mm-es szénszálás kompozit próbatesteket gyártottunk, amelyek 2 mm-es vastagsággal rendelkeztek. Továbbá a vezetőképesség vizsgálatához nanorészecskéket tartalmazó 200x200x3 mm-es epoxigyanta próbatesteket is öntöttünk.

3. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben bemutatásra kerülnek a vizsgálati módszerek és eredmények.

3.1. Vezetőképesség vizsgálat

A vezetőképesség vizsgálatokat Agilent 34970A adatgyűjtő műszeren végeztük, ahol az ellenállást, azaz a vezetőképesség reciprokát mértük négyponos ellenállásméréssel, majd a próbatestek hosszának és keresztmetszetének függvényében elemeztük azok fajlagos ellenállását (ρ) (2. ábra).



2. ábra. A vizsgálatok során alkalmazott elrendezés, ahol t a próbatest vastagsága, l pedig a próbatest hossza

A vizsgálatokat 200x200x3 mm-es epoxigyanta és 250x25x2 mm-es befoglaló méretekkel rendelkező szénszálás próbatesteken végeztük szobahőmérsékleten. A vizsgálatunk során kapott eredményeket az 1. táblázat foglalja össze.

Az eredményeink alapján elmondható, hogy epoxigyanta esetén a nanorészecskék minden esetben csökkentették a fajlagos ellenállását az anyagnak. Továbbá, hogy a legkisebb fajlagos ellenállásokat szén nanocsövek által sikerült elérnünk.

1. táblázat. Az ellenállásmérések során mért fajlagos ellenállások értékei

Próbatest neve	ρ [Ωm]
EP	$1,7 \cdot 10^{+4} \pm 9,6 \cdot 10^{+1}$
EP + 1m% CNT	$3,3 \cdot 10^{+1} \pm 7,3 \cdot 10^0$
EP + 2m% CNT	$3,0 \cdot 10^{-2} \pm 4,7 \cdot 10^{-3}$
EP + 1m% grafit	$3,8 \cdot 10^{+3} \pm 1,1 \cdot 10^{+2}$
EP + 2m% grafit	$3,4 \cdot 10^{+3} \pm 3,3 \cdot 10^{+2}$
EP + 1m% korom	$2,4 \cdot 10^{+3} \pm 6,5 \cdot 10^{+2}$
EP + 2m% korom	$4,2 \cdot 10^{+1} \pm 2,8 \cdot 10^{+1}$
UD + EP	$1,1 \cdot 10^{-4} \pm 4,8 \cdot 10^{-5}$
UD + EP + 1m% CNT	$6,6 \cdot 10^{-5} \pm 1,5 \cdot 10^{-5}$
UD + EP + 2m% CNT	$4,4 \cdot 10^{-5} \pm 8,7 \cdot 10^{-6}$
UD + EP + 1m% grafit	$9,9 \cdot 10^{-5} \pm 1,2 \cdot 10^{-5}$
UD + EP + 2m% grafit	$9,0 \cdot 10^{-5} \pm 8,2 \cdot 10^{-6}$
UD + EP + 1m% korom	$1,1 \cdot 10^{-4} \pm 7,6 \cdot 10^{-7}$
UD + EP + 2m% korom	$9,0 \cdot 10^{-5} \pm 3,0 \cdot 10^{-7}$

Megfigyelhető még, hogy a tiszta epoxigyantához képest a szénszálás kompozitok esetén jelentősen csökkent az anyag fajlagos ellenállása, ugyanis a szénszálak egy összefüggő kapcsolatot tudtak adni az anyagnak. Összességében azt tapasztaltuk, hogy mind az epoxigyanta, mind a szénszálás kompozit esetén a szén nanocsövek tudták a legnagyobb javulásokat mutatni.

3.2. Mechanikai vizsgálatok

A húzóvizsgálatokhoz MSZ EN ISO 527-5:2022-es szabványt alkalmaztuk. Az anyagok szakítószilárdságát (σ), illetve modulusát (E) elemeztük. Az epoxigyanta próbatestek névleges befoglaló méretei 200x25x3 mm, míg a kompozit próbatestek méretei 250x25x2 mm voltak. A vizsgálatokat epoxigyantából készült próbatestek esetén Zwick Z020, kompozit próbatestek esetén pedig Zwick Z250-es szakítógépen végeztük szobahőmérsékleten. A mérés eredményeit az 2. táblázat foglalja össze.

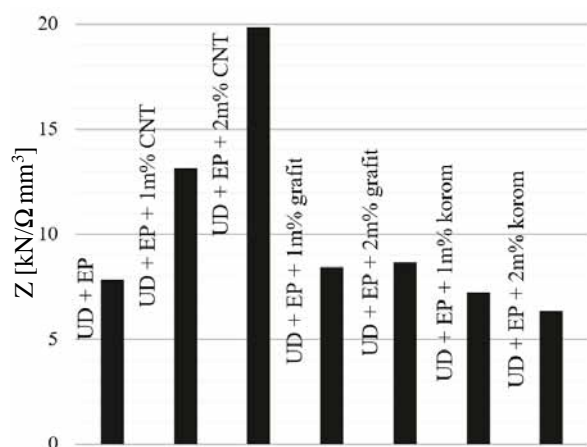
2. táblázat. A mechanikai vizsgálatok során mért szakítószilárdság és modulus értékek

Próbatest neve	σ [MPa]	E [GPa]
EP	$58,9 \pm 6,4$	$2,4 \pm 0,2$
EP + 1m% CNT	$42,1 \pm 3,3$	$5,2 \pm 0,4$
EP + 2m% CNT	$39,6 \pm 7,1$	$3,7 \pm 0,4$
EP + 1m% grafit	$42,6 \pm 17,3$	$2,6 \pm 0,4$
EP + 2m% grafit	$38,9 \pm 5,9$	$3,6 \pm 0,8$
EP + 1m% korom	$36,0 \pm 2,3$	$2,7 \pm 0,1$
EP + 2m% korom	$18,1 \pm 5,8$	$4,1 \pm 0,6$
UD + EP	$849,0 \pm 38,2$	$17,8 \pm 1,4$
UD + EP + 1m% CNT	$859,4 \pm 25,8$	$16,4 \pm 0,8$
UD + EP + 2m% CNT	$873,6 \pm 41,0$	$18,6 \pm 1,2$
UD + EP + 1m% grafit	$838,0 \pm 68,6$	$16,5 \pm 1,4$
UD + EP + 2m% grafit	$783,7 \pm 18,2$	$14,9 \pm 2,1$
UD + EP + 1m% korom	$786,0 \pm 17,2$	$14,4 \pm 1,7$
UD + EP + 2m% korom	$576,0 \pm 70,7$	$11,8 \pm 0,4$

A szakítóvizsgálatok alapján elmondható, hogy az epoxigyantából készült próbatetek esetén mindhárom részecske csökkentette a szakítószilárdságot. Ez annak volt köszönhető, hogy a nanorészecskék képesek az aggregálódásra és a létrejövő aggregátumok hibahelyként voltak jelen az anyagban, így csökkentve annak szakítószilárdságát. Azonban a bekevert részecskék minden esetben javítani tudták az alapanyag modulusát.

Kompozit próbatetek eredményeiből látszik, hogy az alap szénszál-as epoxigyanta szakítószilárdságához képest javulást egyedül szén nanocsövek alkalmazásával lehetett elérni. Korom és grafit esetén csökkenés volt megfigyelhető. Ez annak köszönhető, hogy a szén nanocsövek szál-as anyagként tudtak együtt dolgozni a szénszálakkal, minimális erősítést adva az alapkompozitnak. A grafit és korom részecskék pedig nem kifejezetten erősítő anyagokként működnek, hanem inkább elektromos vezetőképesség javítására szolgálnak. Továbbá rendkívül hajlamosak az aggregálódásra, amely által hibahelyeket hoznak létre a mátrix anyagban, így csökkentve az epoxigyanta és a szénszálak közötti adhéziós kapcsolatot.

Ha megfelelő vezetőképés szerkezeti kompozitot szeretnénk gyártani, ismernünk kell, hogy az anyag a vezetőképességéhez képest milyen mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik. Így a 3.1. és a 3.2. alfejezetben kapott eredmények által értékeltük a kompozit próbatesteinkre, hogy milyen összefüggésben áll a vezetőképességükhöz képesti szilárdságuk. Így meghatároztuk a próbatetek fajlagos ellenállására fajlagosított szakítószilárdság értékeit (Z), mértékegysége $[\text{kN}/\Omega \text{mm}^3]$, amely eredményeket a 3. ábra szemlélteti.

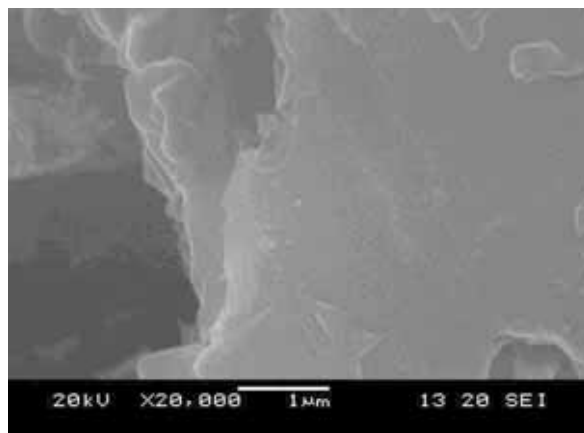


3. ábra. Fajlagos ellenállásra fajlagosított szakítószilárdság értékek

Az alap szénszál és epoxigyanta $7,8 \text{ kN}/\text{mm}^3$ fajlagos szakítószilárdsággal rendelkezett. Az eredmények alapján elmondható, hogy a legjobb vezetőképesség és szakítószilárdság értékeket a szén nanocsövek alkalmazásával lehetett elérni. 1m%-os szén nanocső tartalom esetén $13,1 \text{ kN}/\text{mm}^3$, 2m%-os szén nanocső tartalom esetén pedig $19,7 \text{ kN}/\text{mm}^3$ fajlagos szakítószilárdságra nőtt az érték. Grafit esetén minimális növekedés (1m% grafit tartalomnál $8,4 \text{ kN}/\text{mm}^3$, 2m% grafit tartalomnál $8,7 \text{ kN}/\text{mm}^3$), korom esetén pedig minimális csökkenés volt megfigyelhető (1m% korom tartalomnál $7,2 \text{ kN}/\text{mm}^3$, 2m% korom tartalomnál $6,4 \text{ kN}/\text{mm}^3$). Ez annak köszönhető, hogy ugyan növelte a grafit és a korom az epoxigyanta vezetőképességét, szénszálak közé juttatva azonban csökkentette a szénszálak és az epoxigyanta terhelésmegosztó kapcsolatát a jelenlévő aggregátumok miatt.

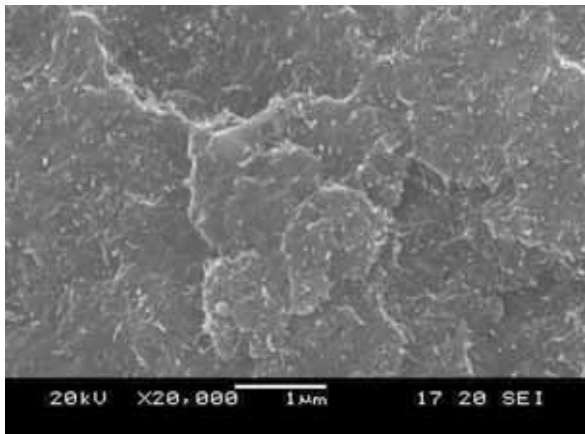
3.3. Próbatelemek pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata

A részecskék eloszlottságát az epoxigyantában, illetve a szénszálak és epoxi kapcsolatát JEOL JSM 6380LA pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk. Vizsgálataink során először megnéztük az alap epoxigyanta töretfelületét, amelyen megfigyelhető a rideg töréskép (4. ábra).



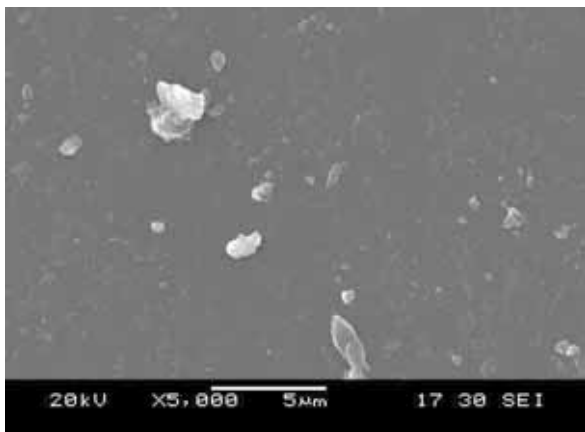
4. ábra. Tiszta epoxigyanta töretfelülete 20 000-szeres nagyításban

A következőkben megvizsgáltuk a szén nanocsövekkel adalékolt epoxigyantát (5. ábra). Az elektronmikroszkópos vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy a nanorészecskék egyenesen eloszlottak. Ugyanakkor tapasztalható volt néhány esetben aggregálódás, amely az anyag szakítószilárdság csökkenését okozta.



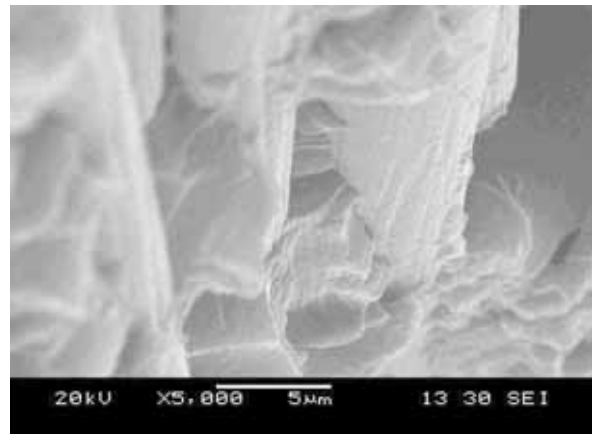
5.ábra. 2m% tartalmú szén nanocső eloszlottsága az epoxi mátrixban 20 000-szeres nagyításban

Grafit és korom esetén célunk volt nagyobb részecskék, azaz aggregátumok keresése, amellyel magyarázható a jelentős szakítószilárdság csökkenés mind epoxigyanta, mind kompozit próbatetek esetén. A 6.ábra egy ilyen eloszlottságot mutat be, ahol megfigyelhetőek nagyobb részecskék, azaz aggregátum.



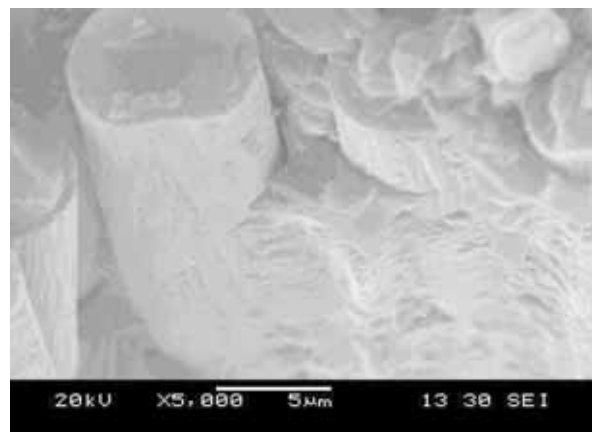
6.ábra. 2 m% korom eloszlottsága az epoxi mátrixban 5 000-szeres nagyításban

Megvizsgáltuk pásztázó elektronmikroszkóppal a kompozitok töretfelületét is. Először itt is a referenciaként szolgáló, részecske-mentes szénszál és epoxigyantát vizsgáltuk (7.ábra). Itt azt tapasztaltuk, hogy a mátrix-erősítőanyag kapcsolat jónak volt mondható, ugyanis a töretfelületen látszódnó szálakon maradtak epoxigyanta foltok, amely által a terheléseket megfelelően át tudták adni egymásnak a szálak.



7.ábra. Szénszál és az epoxigyanta csatlakozása a kompozitban 5 000-szeres nagyításban

Az alap kompozit próbatetekhez képest szén nanocsőekkel ellátott próbatetek esetén nem találtunk jelentősen eltérő epoxigyanta-szénszál kapcsolatot. Azonban grafit és korom esetén megfigyelhető volt, hogy az epoxigyanta és szénszál közötti kapcsolat gyakran nem volt megfelelő, ugyanis azok a törés során elváltak. Egy ilyen kapcsolatot láthatunk a 8.ábrán is, ahol megfigyelhető, hogy a szénszál és az epoxigyanta között a törés során megszűnt a kapcsolat, így a szénszál könnyedén elvált az epoxigyantától. Ez a jelenség magyarázatot ad a grafittal és korommal adalékolt kompozitok esetén a szakítószilárdság és modulus értékek csökkenésére, ugyanis így nem tudott létrejönni a megfelelő szénszál-epoxigyanta kapcsolat, amely el tudta volna osztani a terheléseket a vizsgálatok során.



8.ábra. Korom hozzáadásával készített szénszálból és epoxigyantából gyártott kompozit 5 000-szeres nagyításban

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során vizsgáltuk a szénszálerősítésű kompozitok vezetőképességét háromféle nanorészecske felhasználásával. Vizsgálataink során a szén nanocső, a grafit és a korom hatását elemeztük a vezetőképesség, illetve a mechanikai tulajdonságok és azok kapcsolatának szempontjából epoxigyantában és szénszálas kompozitokban. Kimutattuk, hogy epoxigyantába, illetve szénszálas kompozitba adagolt szén-alapú nanorészecskékkel javítható az anyag vezetőképessége, azonban a részecskék hatással vannak a mechanikai tulajdonságokra. Kompozit próbatestek esetén szén nanocsövek adalékolásával növelhető a szakítószilárdság, amellyel jobb fajlagos ellenállásra fajlagosított szilárdság értékeket lehet elérni, amely tulajdonság fontos, ha vezetőképés szerkezeti kompozitot szeretnénk előállítani. Grafit és korom esetén azonban elmondható, hogy hiába figyelhető meg a vezetőképesség javulása, az a mechanikai tulajdonságok romlását fogja okozni. Ennek oka, hogy ezen részecskék hajlamosabbak az aggregálódásra, így hibahelyek keletkeznek az anyagban, amely által a fajlagos ellenállásra fajlagosított szakítószilárdság értékeik nem fognak jelentősen különbözni az alap szénszálerősítő epoxigyanta kompozittól.

További megoldásra váró feladat a nanorészecskék aggregálódásának csökkentése és reprodukálhatóbb gyártástechnológia alkalmazása.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk 2022-2.1.1-NL-2022-00012 számú "Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratórium" projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási és Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Laboratóriumok pályázati program finanszírozásában valósult meg.

A cikk „A Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program (DKÖP) által támogatott projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatallal kötött támogatási szerződés alapján valósult meg.”

6. IRODALOM

- [1] Czikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest (2000).
- [2] Zhao Q., Zhang K., Zhu S., Xu H., Cao D., Zhao L., Zhang R., Yin W.: Review on the electrical resistance/conductivity of carbon fiber reinforced polymer. *Applied Sciences*, 9, 2390 (2019).
- [3] Visakh P. M., Thomas S., Chandra A. K., Mathew A. P.: *Advances in elastomers II: composites and nanocomposites*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (2013).
- [4] Lee G., Sung M., Youk J. H., Lee J., Yu W. R.: Improved tensile strength of carbon nanotube-grafted carbon fiber reinforced composites. *Composite Structures*, 220, 580–591 (2019).
- [5] Rankin S. M., Moody M. K., Naskar A. K., Bowland C. C.: Enhancing functionalities in carbon fiber composites by titanium dioxide nanoparticles. *Composites Science and Technology*, 201, 108491 (2021).
- [6] Seok D., Jeong Y., Han K., Yoon D. Y., Sohn H.: Recent progress of electrochemical energy devices: metal oxide-carbon nanocomposites as materials for next-generation chemical storage for renewable energy. *Sustainability*, 11, 3694 (2019).
- [7] Alarifi I. M.: Investigation the conductivity of carbon fiber composites focusing on measurement techniques under dynamic and static loads. *Journal of Materials Research and Technology*, 8, 4863-4893 (2019).
- [8] Meguid S. A., Weng G. J.: *Micromechanics and nanomechanics of composite solids*. Springer, Cham (2018).
- [9] <https://nanografi.com/blog/conductive-materials-and-industrial-applications/> (2023.10.13.)
- [10] Khan J. B., Smith A.C., Tuohy P.M., Gresil M., Soutis C., Lambourne A.: Experimental electrical characterisation of carbon fibre composites for use in future aircraft applications. *IET Science, Measurement & Technology*, 13, 1131–1138 (2019).
- [11] Katunin A, Krukiewicz K., Turczyn R., Sul P., Bilewicz M.: Electrically conductive carbon fibre-reinforced composite for aircraft lightning strike protection. *IOP Conference Series Material Science and Engineering*, 201, 021008 (2017).

EGYEDI DIAGNOSZTIKAI ADAPTEREK FEJLESZTÉSE, KÜLÖNBÖZŐ AUTÓIPARI ALKALMAZÁSOKHOZ A TERMÉKFEJLESZTÉSI MÓDSZER ALAPELVEIN KERESZTÜL

DEVELOPMENT OF CUSTOM DIAGNOSTIC ADAPTERS FOR DIFFERENT AUTOMOTIVE APPLICATIONS THROUGH THE PRINCIPLES OF THE PRODUCT DEVELOPMENT METHOD

Bús Attila ügyvezető Innovoflex Kft., Demeter Péter ügyvezető Innovoflex Kft.

ABSTRACT

After assembly, car engines are tested using various diagnostic methods. During the diagnostic measurement, a system test is performed on the assembled engine. They check wiring, ignition cables, transformers and spark plugs, electrically operated butterfly valves, intake manifold valves, camshaft adjusters and all other electronic components. Innovoflex Ltd. designs and manufactures various manually operated test connectors for performing diagnostic tests.

1. BEVEZETÉS

A gépjárművek rendkívül összetett mechatronikai rendszert alkotnak. Gépészeti egységei és rendszerei irányítottak, mint például a motor, az erőátvitel, a futómű, a fékrendszer, a komfortrendszerek, valamint a járműviselkedés felügyeleti rendszerei. A különféle korszerű gépjármű motoroknak az üzemeltetésük során magasfokú üzembiztonsággal kell működniük. Ezért nagyon fontos tényező, hogy a motorokat az összeszerelése után különféle diagnosztikai módszerekkel megvizsgálják. A diagnosztikai mérés folyamán az összeszerelt motorhoz hidraulikus vagy villamos örvényáramú fékgépet kapcsolnak és egy rendszerteszten hajtanak végre. Megvizsgálják a kábelezést, gyújtókábeleket, -trafókat és -gyertyákat, az elektromos mozgató pillangószelepeket, szívócsőszelepeket, a vezérműtengely-állítókat és minden más elektronikus elemet. A diagnosztikai tesztek végrehajtásához tervez és gyárt különféle kézi működtetésű teszt-csatlakozókat az Innovoflex Kft.

2. CÉLKITŰZÉSEK ÉS FELADAT MEGFOGALMAZÁS

A diagnosztikai csatlakozók kialakítása során számos szempontot kell figyelembe venni

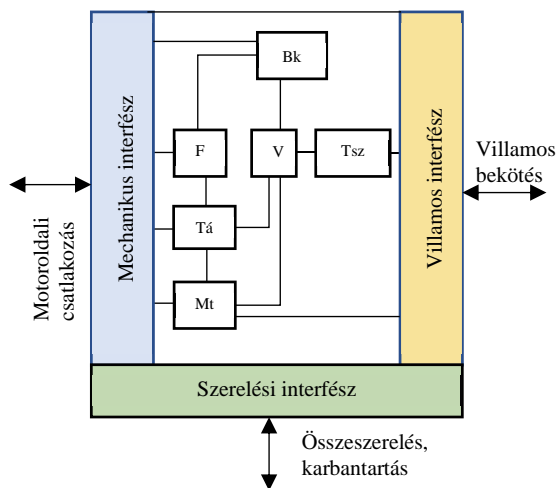
ahhoz, hogy a csatlakozók az elvárt, a megvalósítást célzó funkcióját teljesíteni tudja. A kifejlesztett csatlakozók, a prototípusok megtervezése után és a végleges dokumentációk elkészülését követően kerülnek gyártásba. A diagnosztikai csatlakozónak a tervezése során magas követelményeknek kell megfelelni, hogy több száz tesztet is megbízhatóan lehessen elvégezni. Meg kell felelni, a vevő által felállított különleges feltételeknek, a gyártási feltételeknek, a szerelés feltételeinek, a raktározás feltételeinek, a felhasználás, a javítás és karbantartás általános elveinek [1], [2], [3].

Főbb követelmények:

- akadálymentes, könnyű manuális működtetésű (billenő karos, vagy lemezzugós kivitel),
- ütésálló, viszonylag robosztus,
- egyszerű csereszabatos alkatrészek alkalmazása,
- deformáció-mentes elektromos csatlakozás (rugós mérőtű alkalmazása),
- egymástól elektromosan szigetelt elektromos csatlakozások,
- stabil és állandó jelátvitel biztosítása
- rendszerbe foglalható legyen (kábelkorbács modulok kialakítása),
- gyors, könnyen és egyszerű csatlakoztatás biztosítása, még nagyobb áramerősségek esetén is,
- ergonomikus kialakítású,
- könnyű karbantarthatóság, szerelhetőség.

3. A DIAGNOSZTIKAI CSATLAKOZÓK FUNKCIONÁLIS BEMUTATÁSA

A módszeres géptervezés egyik lépése a tervezendő termék funkcióstruktúrájának felírása. Az diagnosztikai csatlakozó funkcióstruktúráját szemlélteti az 1. ábra.



1. ábra. A diagnosztikai csatlakozók fő funkcióinak feltárása

- **Fej (F):** általában nem fémes anyagból készül részegység, ami magába foglalja a tűágyat. Kialakítására különös figyelmet kell fordítani, mert ez az elem csatlakozik a tesztelni kívánt motor adott szenzorához. Alakja sok esetben egyedi kialakítású.
- **Tűágy (Tá):** elektromosan szigetelt műanyagból készül elem, amibe a kulcsfontosságú funkciót ellátó mérőtűk vannak szerelve. Kialakítása nagyban függ a vizsgálandó szenzor alakjától és belső kódolásaitól. Környezeti behatásokkal szemben ellenállónak, egyszerűen karbantarthatónak és csereszabatosnak kell lennie.
- **Mérőtű (Mt):** elektromosan vezető, rugós visszatérítésű alkatrész. Ezzel az elemmel vizsgálják a motorokon szerelt szenzorok elektromos kontaktját. A tesztelési folyamat során a legtöbbet használt alkatrész. Kereskedelmi termék.
- **Műanyag testrész (V):** elektromosan szigetelt műanyagból készül elem. Forgácsolt vagy műanyagöntéssel készült részegység, amely könnyű tömegű, viszonylag robusztus és ergonomikus kialakítású.
- **Billenőkar (Bk):** fémből készült elem, aminek a feladata, hogy a diagnosztikai csatlakozót rögzítse a motor szenzorához. A rögzítési feladatot speciális esetben egy alakos laprugó látja el.
- **Tömszelence (Tsz):** feladata, hogy a diagnosztikai csatlakozó mérőtűihez forrasztott speciális vezeték ne tudjon elmozdulni és törésmentesen lépjen ki a műanyag testrészből.



2. ábra. A diagnosztikai csatlakozók általános felépítése

Az általános kézi adapter részfunkciói:

- Fp:** A pólusok számát megadó funkció (Megmutatja, hogy mennyi az adott csatlakozó pólus száma)
- Fk:** A csatlakozási alakot meghatározó funkció (A csatlakozók külső és belső kontúrja különböző lehet, amihez többféle pólus szám tartozhat)
- Fkk:** A csatlakozó felületen kialakított kódolások funkciója (A csatlakozók külső vagy belső kontúrján kódolások lehetségesek, hogy a vizsgált berendezésen található azonos kontúrral rendelkező csatlakozók jól elkülöníthetők legyenek)
- Fr:** Az adapter csatlakozását rögzítő megoldás funkciója (Ez határozza meg, hogy az adott adapter milyen módon van rögzítve a vizsgált csatlakozón {csavaros, karos, rugós})
- Frh:** A rögzítő helyzetét meghatározó funkció: (A kialakított rögzítő megoldás melyik részegységhez van szerelve)
- Fmf:** A mérőtű érintkezési felületének funkciója (A mérőtű érintkezési felületének kialakítása)
- Fmts:** A mérőtű szerelési és rögzítési funkciója: (A mérőtű szerelési módja és annak rögzítése)
- Fmte:** A mérőtű elektromos kapcsolatának funkciója (A mérőtűre forrasztott vezeték)
- Fil:** A két fő részegység kapcsolódási funkciója (a fej és ház részegységek összeszerelésekor milyen megvezetés, illetve illesztési felületek vannak)
- Frö:** A két fő részegység rögzítési funkciója (A fej és ház fő részegységek összeszerelési módja)

4. A DIAGNOSZTIKAI CSATLAKOZÓK FEJLESZTÉSE

Az első szakaszban tanulmányoztuk a csatlakozóink általános felépítését és funkcióstruktúrákat határoztunk meg. Ezután kielemeztük, hogy az adott funkcionális részek feladatát, és a hibaforrásokat [4]. Az általunk feltárt és a vevőktől visszakapott problémákat összegeztük, elemeztük és hibafeltáró módszerek segítségével feltártuk a hibák okait. Az elemzés során összegyűjtöttük és csoportosítottuk a jelentkező hibákat, majd ajánlásokat dolgoztunk ki. Létrehoztunk egy általános tervezési utasítást, mely a tervezési munkát hivatott segíteni a későbbiekben.

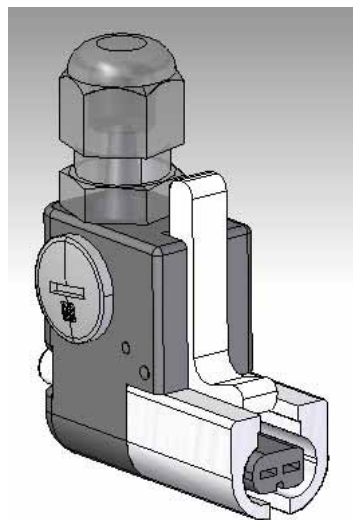
A felmerült követelményeknek megfelelően felülvizsgáltuk a jelenleg használt alapanyagainkat és új nyersanyagokat teszteltünk, melyeknek egy részét a jövőben alkalmazni tudjuk az új diagnosztikai csatlakozóink gyártásánál.

A feltárt hibaanalízis alapján kiderült, hogy a jelenleg használt mérőtűk, nem teljesítik megfelelően a velük szemben támasztott követelményeket (**Fmf**, **Fmszt**, **Fmte**). Gyakori hiba volt a túberagadás, a mérőtű becsúsza és az ellenőrzött motoroldali csatlakozók érintkezőinek elhajlása. Ezért alvállalkozói segítséggel különféle mérőtűk és hüvelyek fejlesztettünk. A projekt folyamán több konstrukciós ötlet is felvetődött, melyek közül több is életképesnek bizonyult. A kifejlesztett mérőtűk a fent említett hibákat sikeresen megszüntették (új konstrukciós mérőtű: MP202-A-210-300-BG a túberagadás ellen; MP202-A-210-300-BG a rövidebb konstrukció megvalósítása; R202-OS-DS és az R202-OS-R-DS típusú hüvelyek a hátra csúszási problémákra; MTBP202-A-200-300-BG jelzésű tű maszkos csatlakozók kialakításánál jelentenek nagy előnyt, melynek tervezésekor nem csak a maszk használatának lehetőségét vettük figyelembe, hanem a beragadási problémákra és a motoroldali érintkező elhajlására is megoldást ad. Az így már birtokunkban lévő új mérőtűk segítségével és a feltárt hibák alapján kidolgozott tervezési javaslatok figyelembevételével négy prototípus csatlakozót terveztünk meg.

4.1. Vezérműtengely jeladó (rövid mérőtű alkalmazása)

Egy olyan rövid kialakítású csatlakozót kellett kifejlesztenünk, amely a motor és a környezetben rendelkezésre álló szűkös helyen

elfér, miközben könnyen fel- és leszerelhető, valamint karbantartható (3. ábra). Teszt közben nem akadályozza a berendezés működését. Megoldásként az MTBP202-A-200-300-BG-S típusú kontaktpin segítségével egy olyan két részből álló rövid csatlakozót sikerült kifejlesztenünk, ami eleget tesz a megadott követelményeknek (**Fmstsz**, **Fmte**).



3. ábra. Vezérműtengely jeladó 3D-s modellje

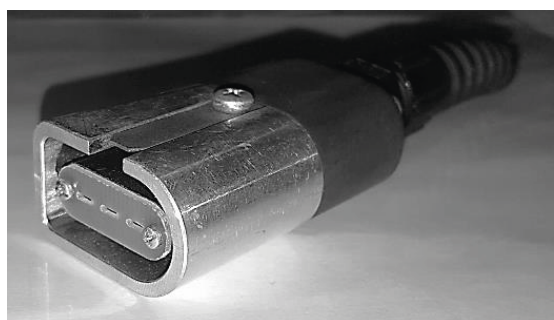
4.2. Raildruckszenzor (maszkos kivitel alkalmazása)

Jelen adapter esetében nagy számban fordultak elő olyan hibák, melyek a helytelen felhelyezés miatt rongálták a motoroldali csatlakozókat. Ez nagy anyagi károkat és jelentős időkiesést okozott a gyártásban. Az MTBP202-A-200-300-BG típusú mérőtű segítségével sikerült egy olyan maszkos csatlakozót kifejleszteni, ami ezeket a hibákat a tesztelési folyamat során kiszűri. Mindeközben a csatlakozó szerelhető, javítható maradt és az említett tű használatával a tűk hátra csúszása is megoldódott (**Fmstsz**, **Fmte**).

4.3. Bypass csatlakozó (rövid mérőtű, extra rövid konstrukciós kialakítás)

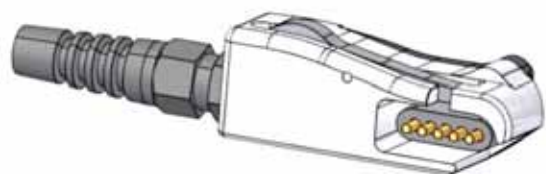
Ez egy olyan speciális csatlakozó, melynek a motoron való elhelyezkedése miatt rövid kivitelűnek és különleges formájúnak kell lennie. A projekt folyamán sikerült egy olyan alumínium házas csatlakozót kifejleszteni (4. ábra), ami a rövid kontakt pinek miatt viszonylag könnyen csatlakoztatható, erős kivitelű (**Frh**, **Fmstsz**, **Fmte**). Továbbá a tűk védelmére a rendelkezésünkre álló prototípus technológiákkal el tudtunk készíteni egy

egyedileg kialakított zárósapkát, ami a könnyű szerelhetőséget biztosítja.



4. ábra. Raildruckszenzor (maszkos kivitel)

Hagyományos anyagokból, hagyományos eljárásokkal ezt a részegységet nem, vagy csak hosszú idő alatt gazdaságtalanul lehetne kialakítani.



5. ábra. Bypass csatlakozó 3D-s modellje

4.4. Forgó csatlakozó alap kivitel

A projekt keretében sikerült egy olyan körbe forgó csatlakozó típust kialakítanunk, amely az első tesztek alapján működőképesnek bizonyult (**Fr, Frh, Fil**).



6. ábra. Forgó csatlakozó alap kivitel 3D-s modellje

Segítségével olyan motoroldali csatlakozókra is könnyedén rá tudunk csatlakozni, ami az eddigi típusokkal nem volt kivitelezhető.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A termelési folyamatok alatt is figyelembe vettük a hibaanalízis során feltárt okokat, hogy elkerüljük a legyártott csatlakozók hibás működését. Gyártás közben teszteltük az új alapanyagokat, az új megoldások funkcionalitását és az egyes részegységek szerelhetőségét. Fontos szempont volt, hogy az újonnan kialakított változatok amellett, hogy teljes mértékben ellátják feladatukat, könnyen szerelhetők, gazdaságosak és a legrövidebb idő alatt előállíthatók legyenek úgy, hogy a gyártás során a legkisebb legyen a hibázási lehetőség. A legyártott csatlakozókat vizsgálatoknak vetettük alá (szemrevételezési vizsgálat, funkcionális teszt, helyszíni teszt vevői részvétellel). Az előbbi tesztek során felmerült igények, problémák figyelembevételével kijavítottuk és tovább fejlesztettük a csatlakozóinkat. Módosítottuk a terveket, melyek alapján elkészítettük az új prototípusokat és javítottuk a hozzájuk tartozó műszaki dokumentumokat. Továbbfejlesztési célként fogalmaztuk meg egy tesztberendezést tervezését és kivitelezését, ami alkalmas a diagnosztikai csatlakozókat tesztelni, ellenőrizni lehet, hogy a velük szembe állított követelményeket megfelelő adatokkal alá lehessen támasztani.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A fejlesztéseinket a Széchenyi 2020, a GINOP-2.1.7-15-2016-00195 azonosító számú, SPECIÁLIS CSATLAKOZÓ CSALÁD FEJLESZTÉSE című támogatási projekt keretei között valósítottuk meg.

7. IRODALOM

- [1] Hansen, F: Módszeres Géptervezés, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1969.
- [2] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.-H. Grote: Engineering Design, London: Springer London, 2007, doi: doi.org/10.1007/978-1-84628-319-2.
- [3] Gy. Takács, Gy. Patkó, Gy. Hegedűs, T. Csáki, A. Szilágyi: Development of Mechatronic Systems at the Institute for Mechatronics at the University of Miskolc, IEEE International Conference on Mechatronics, 2006, doi: doi.org/10.1109/icmech.2006.252548.
- [4] Pahl, G.; Beitz W.: Konstruktionslehre–Handbuch für Studium und Praxis, ISBN 963 10 3796 7, Springer-Verlag, Berlin, 1981., 2003., 2005., 2007, doi: doi.org/10.1007/978-3-662-02288-7

SÍKLEMEZ ALAKÚ PRÓBATEST SZAKÍTÓVIZSGÁLATÁNAK MODELLEZÉSE

MODELLING OF TENSILE TEST FOR SIMPLE FLAT SPECIMEN

Domokos Tatiane

*Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet és Gép- és Terméktervezési Intézet,
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metwadas@uni-miskolc.hu*

Szávai Szabolcs

*Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet,
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: szavai.szabolcs@uni-miskolc.hu*

Baksa Attila

*Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet,
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: attila.baksa@uni-miskolc.hu*

ABSTRACT

In recent years, there is an increasing interest of several industries, such as, aerospace, automotive, steel and aluminum industries in numerical simulation of the fracture process of specific structural materials. The lightweight design is becoming one of the main targets in the development of a new car. This is countertendency with the trend of the last decades when the mass of the vehicle has increased progressively. The reduction of the weight of the vehicle is of great importance from two linked points of view: the reduction of the fuel consumption and the reduction of the CO₂ production [3]. It is not new that is expected of developers of commercial codes (LS-DYNA, Abaqus and PAM-CRASH) to implement reliable fracture criteria into those codes.

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben a kétfázisú (DP) acélok jelentősége az autópárhazban is folyamatosan nőtt. A DP acél speciális mikrostruktúrával rendelkezik, tekintettel a ferrit és a martenzit tartalomra, így nagy szilárdságú és fokozott alakíthatóságú jellemzi. Ezek a jellemzők igazolják az Ultra-Light Steel Auto Body Advanced Vehicle Technology európai programjának előrejelzését, amely szerint a DP acélok a modern karosszéria-szerkezetben 50%-ot meghaladó mértékben kell alkalmazni [1].

2. A SZIMULCIÓS KÖRNYEZET

Az Abaqus egy közismert végeselem-módszert alkalmazó szoftverrendszer, mely különböző multifizikai mérnöki feladatok szimulációjára alkalmas, miközben a vizsgált alkatrész geometriájára nincs korlátozás. A szoftvert

különböző nemlinearitások hatékony modellezésére fejlesztették ki úgy, mint nagymértékű elmozdulások, illetve alakváltozások pontos leírása, vagy a legkülönbözetőbb nemlineáris anyagmodellek alkalmazása. Kiválóan alkalmas a szoftver a peremfeltételi rendszerben (érintkezés/eltválás során) tapasztalható nemlineáris viselkedés nyomon követésére is. Az Abaqus/Explicit olyan tranziens dinamikai jelenségek szimulálására szolgál, mint az ejtésteszt, a törésbiztonsági kérdések tisztázása, vagy a ballisztikus ütközések kérdései [2].

3. GURSON-TVERGAARD-NEEDLEMAN (GTN) MODELL

A GTN egy analitikusan működő, általánosan használható anyagmodell, amelyet a mérnöki szimulációk során alkalmaznak. Elsősorban az anyagi meghibásodások becslésére, melyek általában fémekben jönnek létre: mint például acél, alumínium vagy réz esetén. A GTN előre jelzi az anyagok nukleációjának, evolúciójának és üregeinek agglomerációja alapján a tönkremenetelt [4].

A GTN modell definíciójában használt folyási felületre felírható, hogy

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(-\frac{3q_2 \sigma_m}{2\sigma_y}\right) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0 \quad (1)$$

ahol σ_M a von Mises redukált feszültség, σ_m az átlagfeszültség, σ_y az anyagra jellemző folyáshatár, míg f^* a módosított tönkremeneteli paraméter. A q_1, q_2 és q_3 mennyiségek anyagállandók. De a folyási felületre fennáll a következő összefüggés is

$$\Phi = \frac{\sigma_M^2}{\sigma_y^2} + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{\text{tr}\sigma}{2\sigma_y}\right) - (1 + q_3 f^{*2}) \quad (2)$$

melyben $\text{tr}\sigma$ a σ feszültségi tenzor első skalár invariánsa. Az f^* módosított tönkremeneteli paraméter az alábbiak szerint határozható meg

$$f^*(f) = f \quad \text{ha } f \leq f_c$$

$$f^*(f) = f_c + \frac{\left(\frac{1}{q_1}\right) - f_c}{f_f - f_c} (f - f_c) \quad \text{ha } f > f_c \quad (3)$$

ahol f az üregek térfogathányada, f_c a kritikus üregek térfogathányada, míg f_f az üregek térfogathányad az anyag tönkremenetelkor, a alkalmazott GTN modellben.

A befoglaló mátrix σ_M von Mises-féle redukált feszültsége számítható a GTN modellben az alábbi összefüggés szerint

$$\sigma_M(\varepsilon_M^{pl}) = \sigma_y \left(\frac{\varepsilon_M^{pl}}{\varepsilon_0} + 1 \right)^n \quad (4)$$

ahol n és ε_0 egyaránt keményedési paraméterek, míg ε_M^{pl} az egyenértékű képlékeny alakváltozás.

Az üregek növekedési üteme a meglévő üregek \dot{f}_g és az új üregek nukleációja \dot{f}_n alapján határozható meg

$$\dot{f} = \dot{f}_n + \dot{f}_g \quad (5)$$

A felírt mennyiségek

$$\dot{f}_g = (1 - f) \text{tr}\dot{\varepsilon}^{pl} \quad (6)$$

$$\dot{f}_n = A \dot{\varepsilon}_M^{pl}$$

$$A = \frac{f_n}{S_n \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_M^{pl} - \varepsilon_N}{S_n}\right] \quad (7)$$

ahol $\text{tr}\dot{\varepsilon}^{pl} = \dot{\varepsilon}_x^{pl} + \dot{\varepsilon}_y^{pl} + \dot{\varepsilon}_z^{pl}$ a térfogati képlékeny alakváltozási sebesség, S_n az üregek nukleációs átlagértéke, f_n az új üregek térfogataránya, mely az üregek nukleációjáért felelős és ε_N az átlagos alakváltozás az üregek nukleációjának időpontjában.

A GTN modell nyolc paramétert tartalmaz, amelyek egy vektorban írhatók fel

$$\Phi = \Phi(q_1, q_2, f_0, f_c, f_f, f_n, \varepsilon_N, S_n). \quad (8)$$

4. ALAKÍTÁSI HATÁRDIAGRAM

Az FLD (Forming Limit Diagram) egy olyan grafikon, amely a főnyúlások értékeit ábrázolja a különböző irányú nyúlások függvényében a tönkremenetel kezdetén. Az FLD meghatározásához speciális mérőberendezésre és

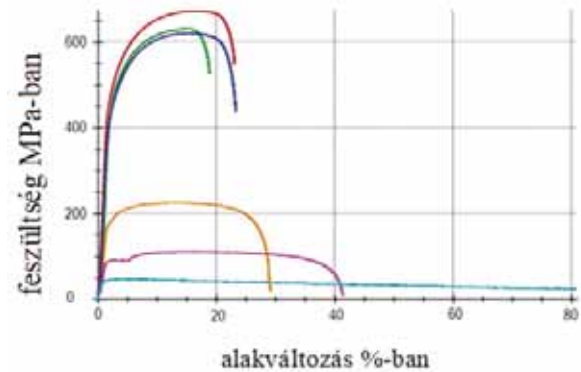
elegendő időre van szükség. Számos kutató hozott létre analitikus és numerikus modelleket ezen problémák megoldásának alternatívájaként [5].

5. A DP600 ACÉL MECHANIKAI TULAJDONSÁGAI

A DP acélokat általában meleghengertelével állítják elő, amelyet gyors hűtés követ a kritikus hőmérséklet tartományból az M_s hőmérsékletre. Az 1. táblázat a DP 600 acél néhány anyagjellemzőjét mutatja $T = 20, 200, 400, 600$ és 800 °C-on (E a rugalmassági modulus $R_{p0,2}$ a folyáshatár, R_m a szakítószilárdság, míg ε a fajlagos teljes nyúlás). A kísérleteket szobahőmérsékleten végeztük [6].

1. táblázat A DP 600 acél mechanikai tulajdonságai a hőmérséklet függvényében

T	E	$(R_{p0,2})$	R_m	ε
°C	GPa	MPa	MPa	%
20	201,40	431	671	22,9
200	200,94	413	630	18,3
400	198,80	378	619	22,9
800	23,63	38	46	80,8



1. ábra Feszültség-alakváltozás görbék a DP600 acél különböző hőmérsékleteire [6].

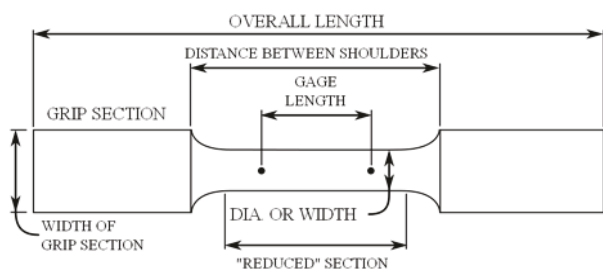
6. PRÓBATESTEK ÉS ANYAGJELLEMZŐIK

A kereskedelemben kapható kétfázisú DP600 acélból kialakított próbatesteket vizsgáltunk. A négyféle kialakítású próbatest kezdeti méreteit a 2. táblázat foglalja össze. A szakítóvizsgálatokat az ISO 6892-1 szabvány szerint folytattuk [7].

2. táblázat Szakítóvizsgálat – A próbatestek geometriai mérete

ID	a_0	a_u	b_0	b_u	L_0	L_u	L_e
1	1,01	0,33	13,17	11,06	50	61,7	50
2	1,01	0,33	13,38	11,19	50	61,1	50
3	1,01	0,38	13,17	10,66	50	61,6	50
4	1,01	0,38	13,38	10,98	50	61,9	50

A 2. táblázatban a_0 a próbatest kezdeti vastagsága (mm), a_u a tönkrementel utáni vastagsága (mm), b_0 a sík próbatest párhuzamos hosszának kezdeti szélessége (mm), b_u a szélesség tönkrementel után (mm), L_0 a kezdeti hossz (mm), L_u a tönkrementel utáni hossz (mm) és L_e az extenziométer szelvényhossza (mm) [8].



2. ábra A próbatestek geometriai mérete [7].



3. ábra Anyagvizsgáló rendszer

A 3. ábrán látható vizsgálatokat a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Nonprofit Kft.-nél végeztük az ISO 6892-1:2016 szabvány B melléklete szerint.

7. EREDMÉNYEK

A kétfázisú acél mechanikai elemzését szakítóvizsgálatokkal és Abaqus-ban végzett numerikus szimulációk segítségével modellezve végeztük el. A különböző geometriai kialakítású próbatestekre a 4. 5. 6. és 7. ábrákon a szimuláció során kapott redukált feszültségek eloszlását lehet látni.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A kétfázisú acél mechanikai viselkedését szakítóvizsgálatokkal majd ezekhez köthető végelem-módszer alapján készült modellel elemeztük. A pontos anyag típus a kereskedelemben kapható DP600 acél volt. A szilárdsági tulajdonságok közvetlen kapcsolatban

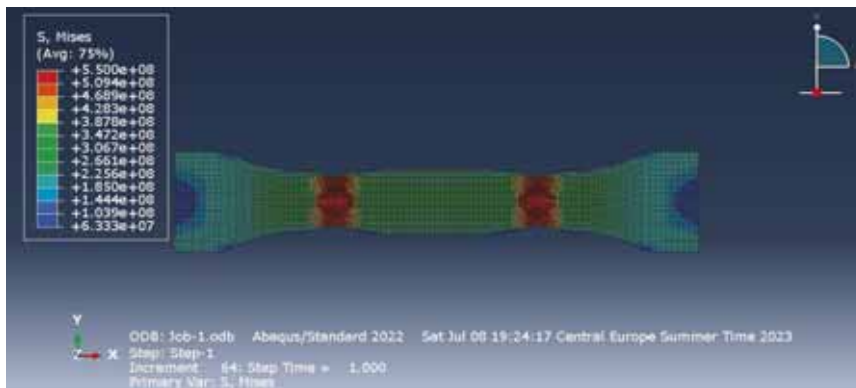
állnak az anyagi mikroszerkezettel. A teljes és a valódi nyúlást is vizsgálták.

A vizsgálatokból a következő fő következtetés vonható le:

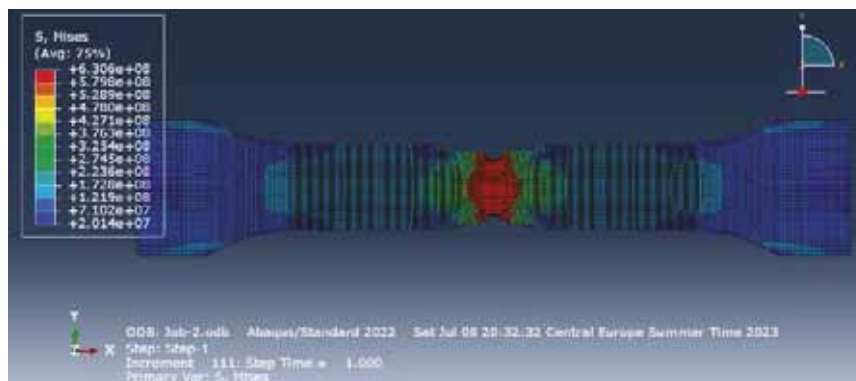
- A képlékeny anizotrópia változó karakterisztikája különböző mérésekkel nem csökkenti jelentősen az átlagos anizotrópiát.
- A teljes és a valódi nyúlás lineárisan csökken az erő növekedésével.

9. IRODALOM

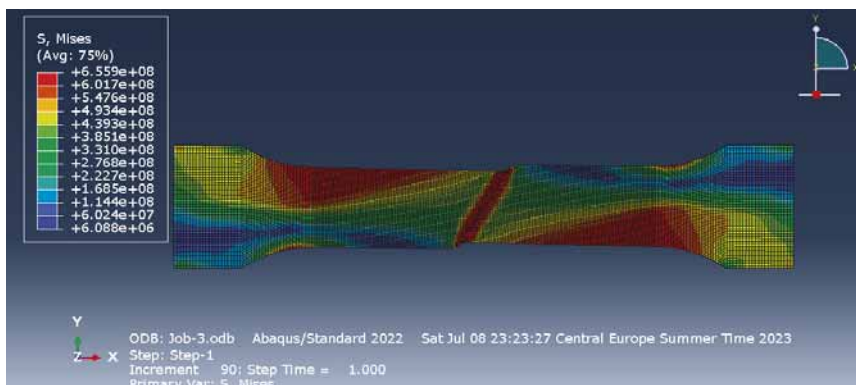
- [1] Gábor B. és Miklós T. (2017). *The Effect of Tensile Strength on the Formability Parameters of Dual Phase Steels*. Springer International Publishing AG 2017. doi: 10.1007/978-3-319-51189-4_19
- [2] Abaqus Mechanical and Civil Engineering Simulation <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
- [3] Belingardi G. (2014). *Lightweight Design of Vehicle Body. A Contribution Toward Greener Environment*. Politecnico di Torino, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Torino, Italy
- [4] Chahboub, Y., Szavai, S., Bezi, Z., *Determination of GTN Parameters of Sent Specimen During Ductile Fracture*.
- [5] M. Abbasi, M. Ketabchi, H. Izadkhan, D.H. Fatmehsaria, A.N. Aghbash (2018). *Identification of GTN Model Parameters by Application of Response Surface Methodology*. Science Direct. <https://www.sciencedirect.com/sci-ence/article/pii/S209526861830257X>
- [6] B. Aydemir, H. Kazdal Zeytin, G. Güven and A. Güngör. *Investigation of mechanical properties of DP 600 steels at elevated temperatures PDF*. TÜBİTAK National Metrology Institute (UME), Gebze, Kocaeli, Turkey.
- [7] ISO 6892-1:2009(en), Metallic materials Tensile testing Part 1: Method of test at room temperature
- [8] R. Gou, W. Dan, W. Zhang, M. Yu (2018). *Prediction on flow behaviors of individual grains in DP600 steel with grain features*. Science Direct Procedia Manufacturing 15 (2018) 1573-1580. 17th International Conference on Metal Forming, Metal Forming 2018, Toyohashi, Japan.



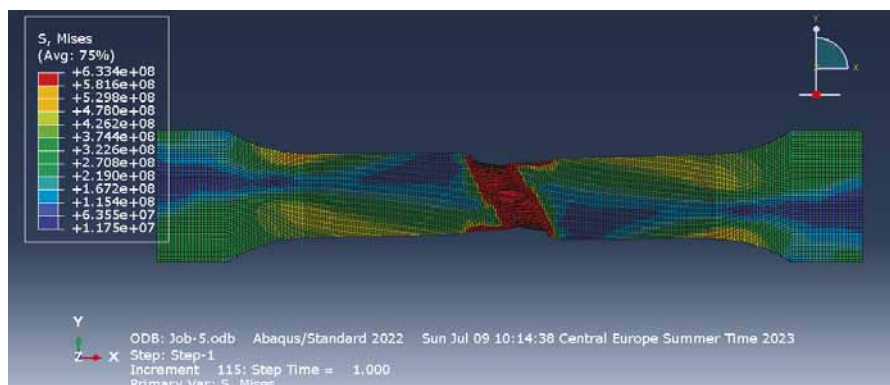
4. ábra Az első próbatest szimulációja.



5. ábra A második próbatest szimulációja.



6. ábra A harmadik próbatest szimulációja.



7. ábra A negyedik próbatest szimulációja.

VÉGESELEM KÖRNYEZETBEN DEFINIÁLT MOZGÓ HŐFORRÁS ANALITIKUS VALIDÁLÁSA

ANALYTICAL VALIDATION OF MOVING HEAT SOURCE DEFINED IN FINITE ELEMENT ENVIRONMENT

Döbrentei Sándor, PhD. hallgató

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék, 1111 Bp. Műegyetem rkp. 3
e-mail: dobrentei.sandor@gt3.bme.hu; web: gt3.bme.hu

Dr. Váradi Károly, egyetemi tanár

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék, 1111 Bp. Műegyetem rkp. 3
e-mail: varadik@eik.bme.hu web: gt3.bme.hu

ABSTRACT. This paper presents the analytical validation method of the flash temperature effect caused by a moving heat source in accordance with a railway wheel-rail interaction during slip. The solution of the analytical method and the convergence of the finite element model are also introduced, focusing on the effect of element size and stepping of moving heat source on the convergence.

1. BEVEZETÉS

Az adhéziós vasúti közlekedés hatékonysága abban rejlik, hogy a kerék-sín kapcsolatban létrejövő érintkezési felület a jármű-pályaméreteihez képest kicsi, így szinte tiszta gördülés jön létre, ami nagyon kis ellenállást jelent a szerelvények mozgatása során. Ugyanakkor fékezés és gyorsítás közben az egymáson legördülő alkatrészek (kerék és sín) eltérő sebességgel mozognak egymáshoz képest, ami különböző mértékű csúszva gördülést eredményez. A nagy felületi terhelésből adódóan már kis relatív sebesség esetén is igen nagy lesz a hőteljesítmény, ami az érintkezésben lévő alkatrészeket terheli. A súrlódásból származó hőteljesítmény a következő összefüggéssel számolható:

$$Q = \mu \cdot F \cdot v_r [W]. \quad (1.1)$$

A fenti egyenletben μ [1] a súrlódási tényező, F [N] a normálerő és v_r [m/s] a felületek közötti relatív sebesség (1. ábra). Az így keletkezett hőmennyiség az érintkezési felületen terheli az érintkezésben lévő testeket, és mindkét felülethez képest mozog. A kerékhez képest v_k kerületi sebességgel, míg a sínhez képest $v_k + v_r$ sebességgel. A hőteher eloszlását a kerék és a sín között az α dimenziótlán hőpartíciós tényezővel vehető figyelembe:

$$Q_k = \alpha \cdot Q, \quad (1.2a)$$

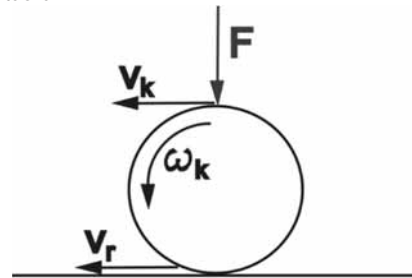
$$Q_s = (1 - \alpha) \cdot Q, \quad (1.2b)$$

ahol Q_k [W] a kerékre jutó hőteher, míg Q_s [W] a sínre jutó hőteher.

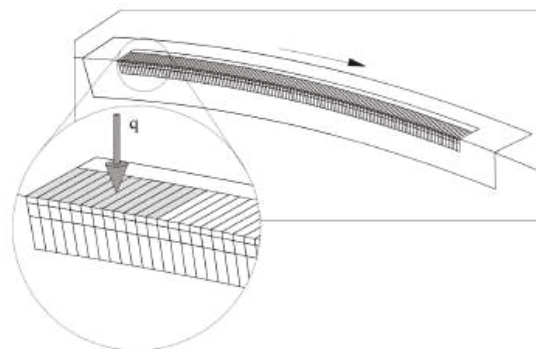
Az [1]-es irodalomban mozgó hőforrás végeeselemes modellezésének metódusa kerül bemutatásra. Itt a szerzők a mozgó hőforrást úgy definiálták, hogy a kerék futófelületén található elemek felületén definiálták a hőfluxust, amely az idő függvényében egyes részeken négyzögjelként rendre

aktiválódott majd deaktiválódott a hőforrás mozgási sebességének függvényében. Az alkalmazott modell a 2. ábrán látható. A modell validálása analitikus eljárás alapján meghatározható maximális hőmérséklet értéke alapján történt. A szakirodalomban meghálálható a hővezetés alapegyenletének megoldása közel végtelen kiterjedésű feltérre, amit Jaeger [2] vezetett le mozgó hőforrás esetére, majd Tian és Kennedy [3] vizsgálták tovább különböző érintkezési viszonyok és sebességek esetére.

Jelen cikkben egy Altair Optistruct környezetben létrehozott, a mozgó hőforrás szimulációjára alkalmas végeeselem modell felépítése és analitikus módszerrel történő validálása kerül bemutatásra.



1. Ábra. Kerék-sín kapcsolat modellje.



2. Ábra. Mozgó hőforrás szimulációja végeeselem környezetben. [1]

2. ANALITIKUS MEGOLDÁS

Az analitikus megoldást a hővezetés differenciálegyenletének izotrop anyagokra érvényes változatának megoldásából kapjuk [4]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\chi} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}, \quad (2.1)$$

ahol T [K] a hőmérséklet, x , y és z a helykoordináták [m], t [s] az idő, χ [m²/s] pedig a termikus diffúzitívitás:

$$\chi = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (2.2)$$

A fenti képletben k [W/mK] a hővezetési tényező, ρ [kg/m³] a sűrűség, C_p [J/kgK] a fajhő. A (2.1)-es egyenlet megoldása különböző alakú érintkezési felületek és különböző eloszlású hőforrások esetére megtalálható [2], [3]-as irodalomban. Végeselem módszer szempontjából megközelítve a problémát a legkézenfekvőbb, ha téglalap alakú hőforrást vizsgálunk egyenletes eloszlással, mert ezt a legkönnyebb modellezni, ha figyelembe vesszük a térbeli diszkrétizációt. A (2.1)-es egyenlet megoldása téglalap alakú hőforrás esetére, amennyiben az v sebességgel mozog a végtelen kiterjedésű féltér felületén, a következő alakban írható fel [2]:

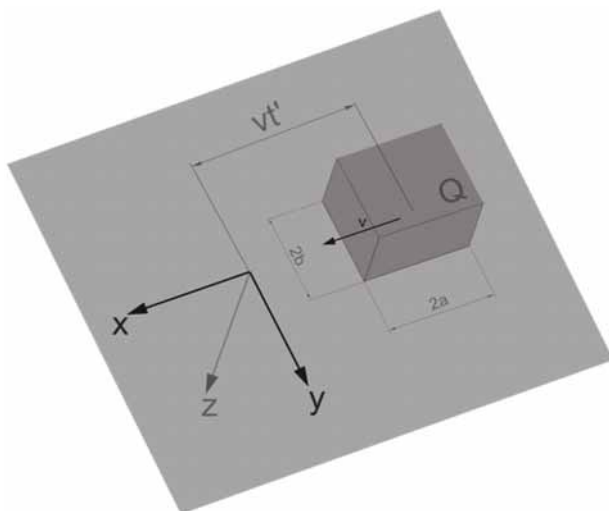
$$T(x, y, z) = \frac{\chi q}{2k v \sqrt{2\pi}} \int_0^v \frac{\text{Exp}\left[-\frac{Z^2}{2u}\right]}{\sqrt{u}} * \left\{ \text{erf}\left(\frac{Y+B}{\sqrt{2u}}\right) - \text{erf}\left(\frac{Y-B}{\sqrt{2u}}\right) \right\} * \left\{ \text{erf}\left(\frac{X+L+u}{\sqrt{2u}}\right) - \text{erf}\left(\frac{X-L-u}{\sqrt{2u}}\right) \right\} du. \quad (2.3)$$

Itt q [W/m²] a területegységre vonatkoztatott fajlagos hőteljesítmény, u pedig integrálási változó. Az erf kifejezés a statisztikából ismert hibafüggvényt definiálja:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \text{Exp}(-u^2) du.$$

A képletben található további mennyiségek a következők:

$$X = \frac{vx}{2\chi}, Y = \frac{vy}{2\chi}, Z = \frac{vz}{2\chi}, L = \frac{va}{2\chi}, B = \frac{vb}{2\chi}, V = \frac{v^2 t'}{2\chi}, \quad (2.4)$$



3. Ábra. Féltér felületén mozgó hőforrás szemléltetése.

ahol a és b a hőforrás fél oldalszélességét jelölik, t' pedig az az időtartam, ami alatt a hőforrás a vizsgált pontba ér. A jelölések értelmezésére a 3. ábra szolgál. Mivel a valóságban az érintkezési felület többszörösen görbült felületek esetén ellipszis vagy kör alakú, így a modellezés során meg kell határozni egy egyenértékű téglalap méreteit a területek egyenlősége alapján [5]. A vizsgált érintkezés paraméterei egy vasúti kerék és sín pár érintkezése, ahol a felületeket összeszorító erő $F=63\,750$ N nagyságú. Ez a terhelés megfelel egy Siemens Viaggio Classic kocsik kerékterhelésének [6]. Ebben az esetben az érintkezési ellipszis fél-tengelyeinek méretei $a=6,3$ mm és $b=5$ mm nagyságúak. Ezzel közel egyenlő téglalap területet kapunk, ha az oldalak hosszát 12 mm-re és 8,25 mm-re választjuk [1]. (2.3)-as összefüggés zárt alakban nem oldható meg, csak numerikus integrálással. Abban az esetben, ha az x -tengely menti hőmérsékleteloszlásra vagyunk kíváncsiak az $y=z=0$ helyen, úgy a (2.4) alatti összefüggésekbe y és z helyére zérust helyettesítve, majd (2.3)-as összefüggést u -szerint numerikusan integrálva a vizsgált x -tengely menti tartomány bizonyos pontjaiban, megkapjuk a keresett hőmérsékleteloszlást. Az integrálás kívánt pontossága a felosztás sűrűségének növelésével érhető el, konvergenciavizsgálatot alkalmazva.

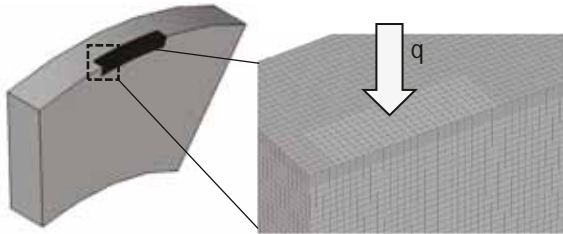
3. A VÉGESELEM MODELL

Mivel az eddigi vizsgálatok csak a termikus modell validálására terjedtek ki, így a végeelem modellben csak a kerék futófelületének egy 40°-os szegmense került vizsgálatra, ugyanis a gyorsan mozgó hőforrás a vizsgált időtartamon belül csak egy szűk környezetben fejti ki hatását. Az (1.2a) összefüggés alapján a vizsgált üzemiállapotban $\mu=0,15$ súrlódási tényezőt és $v_r=15$ km/h relatív sebességet feltételezve az előző fejezetben említett terhelő erővel és $\alpha=0,5$ -ös hőpartíciós tényezővel számolva a kerékre jutó hőmennyiség:

$$Q_k = 0,5 * 0,15 * 63.750 * 4,1667 = 19.922 \text{ W}.$$

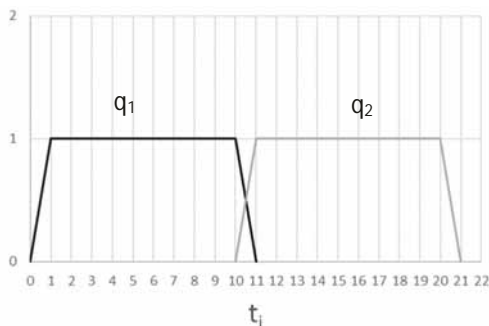
Ez a hőmennyiség egyenletesen oszlik el az $A=12*8,25=99$ mm² területű téglalappal modellezett érintkezési felületen. A számítás során használt termikus anyagjellemzők: $k=54$ W/mK, $\rho=7850$ kg/m³, $C_p=465$ J/kgK, a kiindulási hőmérséklet: $T_{ref}=22^\circ\text{C}$. A vasúti kerék karimáját figyelmen kívül hagyva, a kerék geometriája szimmetrikusnak tekinthető, így a középsíkban szimmetriasíkot feltételezve a modell mérete csökkenthető. Ilyenkor termikus vizsgálatnál a szimmetriafeltétel, hogy erre a síkra merőlegesen a hőáram zérus, ami természetes peremfeltétel, így nem kell külön definiálni. A vizsgálatnak ebben a szakaszában a felületi hőátadás és hőszugárzás a környezet felé elhanyagolásra került. A modellezés során a kerék felületének íves része is sík felülettel lett figyelembe véve. A szegmens belső sugara 300 mm, a külső 460 mm, szélessége 20 mm a szimmetriafeltétel alkalmazása után. A használt elemméret a futófelületen 0,5 mm, melynek vastagság irányú mérete a felülettől 1 mm távolságon belül 0,1 mm volt. Az alkalmazott elem típus 20 csomópontos hexaéder elem volt. Az elemméret megválasztásánál kiindulási alapot

nyújtott az analitikus eljárás során kapott eredményekből számolható hőmérséklet gradiens. A vastagság mentén az elemek oldalhosszának értéke az itt tapasztalható nagyobb hőmérséklet gradiens miatt az 1/5-re lett redukálva. Az első futtatás során alkalmazott háló a 4. ábrán látható. Az ábrán jelölve van a hőforrás definiálása is, a futófelületen található elemek felső felületén. A hőforrás mozgása az első



4. Ábra. A vizsgált szegmens és az alkalmazott háló.

számításnál 1 mm-es lépésközökben került léptetésre. Ez Optistruct-ban úgy érhető el, hogy a 4. ábrán látható hőforrást 1 mm-es eltolásokkal definiáljuk, és minden hőteher a hőforrás mozgásának megfelelően aktiválódik. A hőforrás mozgási sebességét a kerékhez képest $v_k=85 \text{ km/h}=23.6 \text{ m/s}$ sebességgel kell figyelembe venni, ami azt eredményezi, hogy a hőteher minden egyes pozícióban $4,2373 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ -ig tartózkodik. Ez az intervallum további tíz időlépésre lett felosztva, és a hőteher mozgása 60 mm-es szakaszon lett vizsgálva a kerület mentén. Ez 600 darab $\Delta t=4,2373 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ nagyságú időlépést jelent összesen. A hőfluxus időbeli diskretizációjának értelmezésére az 5. ábra szolgál. Az ábrán jól látható, hogy mivel a számítás bemeneti adatainak definiálása során egy időlépésnyi időintervallumra van szükségünk a hőáram be- illetve kikapcsolására, így bekapcsolt állapotban csak 9 időlépést tölthet, így elkerülhető a felesleges hőbevitel. Annak érdekében, hogy a bemenő adatok definiálása során kiküszöbölhető legyen a hosszadalmas munka és a nagy hibázási lehetőség, ami a 60 időlépés manuális definiálásából ered, az adatokat egy FORTRAN nyelven megírt kód generálta az Optistruct által beolvasható formátumnak megfelelően. Ez nagyban egyszerűsíti a későbbiekben a módosítást is, amennyiben finomításra lenne szükség. Fentiek ismeretében 60 lépést vizsgálva a szimuláció ideje összesen $t=2,5424 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ -nyi időtartamra terjedt ki.

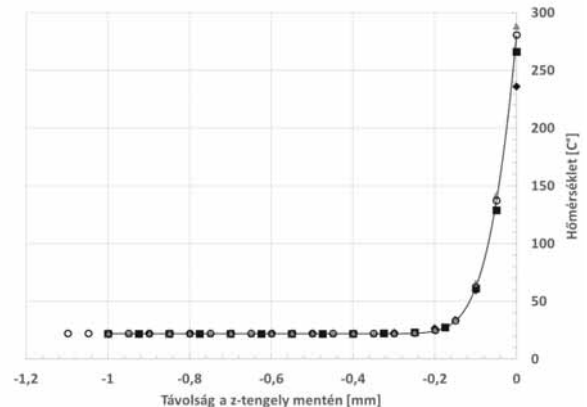
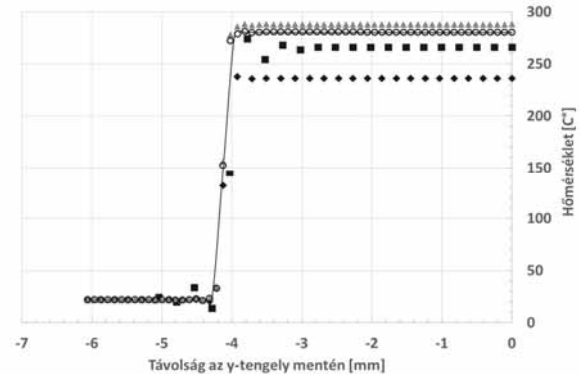
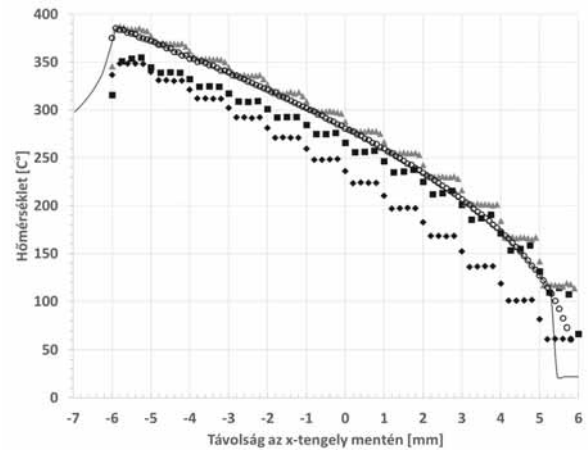


5. Ábra. A hőfluxus aktiválása ugrásfüggvény segítségével.

4. AZ EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

Ebben a fejezetben az analitikus eljárással és a szimulációval kapott eredmények kerülnek összehasonlításra. A kapott hőmérséklet eloszlásokat a

6. ábra szemlélteti. Az ábrán folytonos vonal szemlélteti az analitikus, a különböző jelölők pedig a szimulációs eredményeket. A vízszintes tengely origója mindhárom esetben a 3. ábrának megfelelő, annyi különbséggel, hogy itt már a hőforrás középpontja az origóban helyezkedik el. Amennyiben a szimuláció előtt rendelkezésre állnak az analitikus eredmények, úgy előzetesen képet kapunk az alkalmazandó elemméretről. A görbéket megvizsgálva megállapítható, hogy az x-tengely mentén a hőforrás hátsó részén számíthatunk nagy hőmérséklet gradiensre, ami jelen esetben egy közel $100 \text{ }^\circ\text{C}$ -os hőmérsékletesés 1 mm-en belül. Ugyanez a helyzet az



- Analitikus
- Durva CHEXA20 háló
- ◆ Finom CHEXA8 háló
- ▲ Finom CHEXA20 háló
- Finom CHEXA20 háló és finomított mozgás

6. Ábra. Analitikus és szimulációs eredmények.

y-tengely mentén, ahol szintén az érintkezési felület szélén jelentkezik jelentős hőmérséklet gradiens, számszerűsítve 260°C-os csökkenés figyelhető meg egy szűk 0,4 mm-es szakaszon. A futófelülettől befelé haladva ugyanakkora hőmérsékletcsökkenés tapasztalható, megközelítőleg 0,2 mm-es tartományban. Ez indokolta az elemméret drasztikus csökkentését vastagság irányban, a futófelülettől távolodva. A finom elemméret mellett az első futtatásnál már magasabb fokszámú elemek kerültek kiválasztásra a gradiensek pontosabb reprodukálhatósága érdekében. Az analitikus eredmények alapján a vizsgálandó tartomány is szűkíthető, mivel jelen esetben a vizsgálatok csak a termikus tranziensek lefutására és a modell validálására terjedtek ki. Ebből kifolyólag a 6. ábra alapján y-irányban egy 6 mm-es, míg z-irányban egy 1 mm-es tartomány lett modellezve. A 6. ábrán négyszöggel vannak jelölve az első futtatásnál kapott eredmények. Látható, hogy x-irányban a nagy hőmérsékletek tartományában a végeselem módszerrel kapott eredmények jelentősen eltérnek az analitikus eredményektől, míg a kisebb hőmérsékletek felé haladva a hiba értéke csökken. Megfigyelhető továbbá az eredmények „lépcsőzetes” jellege, melyet a szakaszosan léptetett hőforrás eredményez. Az y-irányú eredményeket tanulmányozva hasonló tendencia figyelhető meg, itt is alsó becslést kapunk a hőmérséklet értékekre. Z-irányban vizsgálva a hőmérsékleteloszlást az eredmények jól közelítik az analitikus görbét.

Az eredmények nagy hibája az elemméret további csökkentését tette szükségessé, számszerűen x- és y-irányban 0,5 mm-ről 0,2 mm-re, z-irányban maradt az eredeti diszkrétizáció. Elemtípusnak első körben 8 csomópontos hexaéder elem került kiválasztásra. Ezzel a modellel kapott eredményeket szemlélteti a csúcsára állított négyzög a 6. ábrán. Látható, hogy az elsőrendű elemekkel kapott eredmények még nagyobb hibával adnak egy alsó becslést a hőmérséklet-eloszlásra mindhárom görbe esetében. Az x-irányú lépcsőzetesség továbbra is megfigyelhető. Ugyanezen a modellel másodrendű elemeket alkalmazva az eredmények pontossága növelhető, ebben az esetben már egy felső becslést fogunk kapni a hőmérsékletmezőre mindhárom esetben. Az így kapott eredményeket szürke háromszög jelöli a 6. ábrán.

Ahhoz, hogy a hőmérsékleteloszlásban jelentkező lépcsőzetességet ki tudjuk küszöbölni, a hőforrást finomabban kell léptetni. Mivel az utóbbi két esetben alkalmazott modellel az elemméret x-irányban 0,2 mm volt, így lehetőség nyílik arra, hogy a hőforrást is 0,2 mm-es lépésekben léptessük. Ennek megfelelően x-irányban ugyanakkora tartomány vizsgálatára 60 lépés helyett 300-at kell definiálni, továbbá az időlépést is aktualizálni kell. 23,6 m/s kerületi sebesség esetén a 0,2 mm-es távolság megtételére $8,4746 \cdot 10^{-6}$ s-nyi időre van szükség, tehát ennyit tartózkodik a hőforrás egy lépésben. Ennél a számításnál a hőforrás minden egyes lépése csak négy időlépésre lett felosztva. Ezzel a teljes számítás 1200 darab $\Delta t = 2,1186 \cdot 10^{-6}$ s nagyságú időlépésből állt. Ezzel a modellel kapott eredményeket a 6. ábrán üres körök jelzik. Látható, hogy az eredmények tökéletesen

fedik az analitikus eredményeket, és a korábbi modelleknél megfigyelhető lépcsőzetesség is megszűnt. Az is észrevehető továbbá, hogy x-irányban az 5-6 mm közötti tartományban az analitikus eljárás egy hirtelen csökkenő hőmérsékletmezőt ad, míg végeselem környezetben ez a hirtelen ugrás nem figyelhető meg, itt gyakorlatilag a görbe meghosszabbításaként egy folyamatos csökkenés tapasztalható. A különböző modellekre vonatkozó hiba értékét foglalja össze az 1. táblázat. A hiba az egyes modellekkel kapott maximális hőmérséklet értékére vonatkozik. A sorszámok a 6. ábrán alkalmazott jelmagyarázat alapján jelölik rendre a szimulációs modelleket (1 – Durva CHEX20 háló és így tovább). Látható, hogy a finomított, magasabb rendű elemekkel készített háló pontossága is már elfogadható hibahatáron belül van, de a hőforrás léptetésének finomítása tovább növeli az eredmények pontosságát és megszünteti a nagy lépésköz okozta „lépcsőzetes” jellegét.

1. Táblázat. Hiba értéke az egyes modellek esetében, a maximális hőmérsékletre vonatkozóan.

Modell #	Hiba [%]		
	x	y	z
1	-7,8	-2,1	-5,4
2	-9,4	-14,7	-15,7
3	0,5	2,8	2,9
4	0,2	0,5	0,3

Az eredmények ismeretében megállapítható, hogy mozgó hőforrás modellezése esetén az elemméret csökkentése és a fokszám növelése mellett a hőforrás mozgásának diszkrétizációja is jelentősen befolyásolja a kapott hőmérsékleteloszlás pontosságát. További vizsgálat tárgyát képezi, hogy mennyiben térünk el négyzög alakú, egyenletes eloszlású hőforrást feltételezve a valóságot jobban közelítő, elliptikus érintkezési felületen fellépő, parabolikus eloszlású hőforrás okozta hőmérséklet-eloszlástól.

5. IRODALOM

- [1] P. T. Zwierczyk and K. Váradi, "Thermal stress analysis of a railway wheel in sliding-rolling motion," *J Tribol*, vol. 136, no. 3, 2014, doi: 10.1115/1.4027544.
- [2] J. C. Jaeger, "Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts," *Journal and proceedings of the Royal Society of New South Wales*, vol. 76, no. 3, pp. 203–224, May 1943, doi: 10.5962/p.360338.
- [3] X. Tian and F. E. Kennedy, "Maximum and Average Flash Temperatures in Sliding Contacts," 1994.
- [4] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids," Oxford University Press, 1959.
- [5] Zwierczyk Péter Tamás, "Thermal and stress analysis of a railway wheel-rail rolling-sliding contact, PhD Thesis," 2015.
- [6] "Viaggio Classic-emotion@rail," 2013.

ALKATRÉSZ REKONSTRUKCIÓS MEGOLDÁSOK TAPASZTALATAI 3D NYOMTATÁSSAL

EXPERIENCE OF COMPONENT RECONSTRUCTION SOLUTIONS WITH 3D PRINTING

*Dr. Dömötör Csaba, egyetemi docens
Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet*

ABSTRACT The article shows the experiences of component reconstruction supported using 3D printing through a few examples. It presents the profile copying technique that can be used as an alternative to traditional measuring methods and 3D scanners for relatively complicated parts.

1. BEVEZETÉS

A gépelemek rekonstrukciója a legalapvetőbb mérnöki feladatok közé tartozik. Ezzel összhangban a gépészmérnöki alapszakos hallgatók minden felsőoktatási intézményben találkozhatnak ilyen jellegű kihívásokkal a tanulmányaik során.

Ezen elemi alkotó tevékenység lényege, hogy egy kézzel fogható, de legtöbb esetben elhasználdott (kopott, törött) alkatrésznek kell meghatározni az eredeti geometriáját. A folyamat fontos része, hogy a kijelölt alkatrészről az újragyártáshoz szükséges méret-, tűrés- és alapanyag-információkat tartalmazó műszaki rajz készüljön, ha nem áll rendelkezésre a gyártási dokumentáció.

2. A REKONSTRUKCIÓ CÉLJA

2.1 Elérhetetlen pótalkatrész

A gépelemek rekonstrukciójára több esetben is szükség lehet. Előfordul, hogy egy adott gép egyszerűen olyan régi, hogy terméktámogatással, illetve a pótalkatrészek beszerzésével nem számolhatunk. Viszont egy-egy meghibásodott, vagy elhasználdott alkatrész cseréjével a drága berendezés élettartama érdemben meghosszabbítható.

2.2 Kieső idő csökkentése

Szintén visszatérő probléma, hogy a cserére szoruló alkatrész beszerezhető ugyan, de kiszállítása jóval több időbe telik, mint amennyit az érintett gép termelésből történő kiesésével megengedhetünk magunknak. Megoldás lehet ilyen esetben egy rövidebb élettartamú - akár szűkebb funkcionalitással bíró -, de az alkatrész

rekonstrukció segítségével gyorsan hozzáférhető gépelem átmeneti használata.

2.3. Gazdaságos javítás

Az előzőhöz hasonló szituáció, amikor a gyári alkatrész olyan magas költségráfordítással vásárolható csak meg, ami az adott berendezés gazdaságos működtetésének ellentmond, viszont az érintett gépelem egy megfelelő gyors prototípusgyártás (RPT) technológiával előállított termékkel hosszú távon is tökéletesen helyettesíthető.

3. HAGYOMÁNYOS GYAKORLAT

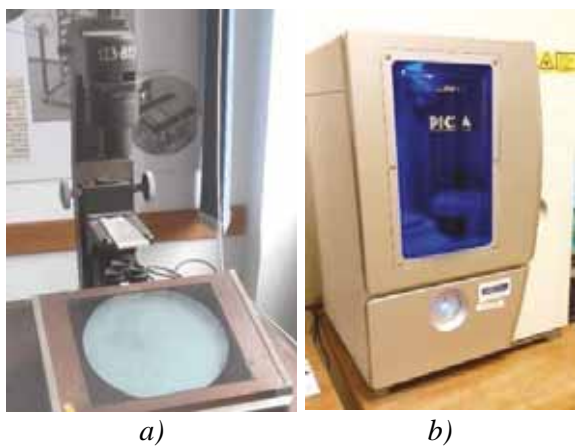
A 2. bekezdésekben felsorolt esetek mindegyikénél elengedhetetlen a szerelhetőség és működtetés szempontjait figyelembe vevő pontossággal bíró geometria meghatározása. [1]

A Miskolci Egyetem mérnök hallgatói a Gépelemek I. c. tantárgy gyakorlati kurzusain általában tengely, tárcsa, fogaskerék, illetve egyszerűbb öntvény jellegű alkatrészek rekonstrukciójának dokumentációs folyamatát kell elvégezzék. A másodéves hallgatóként elsősre nehéz feladatnak tűnő munka során gyakorlatot szerezhetnek a hagyományos mérőeszközök (tolómérő, mikrométer, rádiusz sablon, menetfésű, stb.) használatában, illetve alkalmazhatják a vetületi ábrázolásról addig elsajátított ismereteiket.

4. ÚJ TECHNIKÁK ALKALMAZÁSA

4.1. Önálló modellalkotó berendezések

A hagyományos mérési módszerek mellett lehetőség van az alkatrészelekről korszerű berendezésekkel történő mintavételre is. Korábban a 2D vetületek meghatározására a mérnökök a - mostanra már technikátörténeti jelentőségű - profilprojektor eszközt használták. (1.a. ábra) Napjainkra viszont a 3D koordináta mérőgépek vagy az érintkezéssel, illetve érintkezés nélküli, optikai felület digitalizáló eszközök is elterjedt megoldásnak számítanak. [2] (1.b. ábra)



a)

b)

1.ábra.

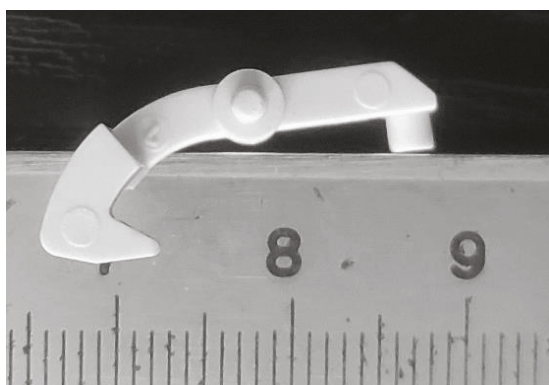
a) Múlt: CarlZeiss Projektor 320

b) Jelen: Roland LPX-1200 laser scanner

4.2. Egy alternatív megoldás

Az említett korszerű geometria digitalizáló technikáknak is megvannak a maguk korlátai, illetve legtöbb esetben használatuk célirányos felkészültséget igényel. Ilyenkor jelent jó megoldást a régi módszerek modern technológiákkal támogatott alkalmazása.

Egy megfelelő felbontású és irányú digitális fotó készítése nagyban hasonlít a „korabeli” profilprojektoros elvhez, de a felvétel feldolgozása itt már számítógép segítségével történik. Minden esetben elengedhetetlen, hogy a rekonstruálni kívánt alkatrész fotóján (vagy mikroszkóp képén) szerepeljen egy pontos milliméter (vagy mikrométer) skála, amit a feldolgozás során etalonként használhatunk.



2.ábra.

Mechanikus időzítő óra kapcsolókarja

5. A FELDOLGOZÁS FOLYAMATA

5.1. Előkészítés és fotózás

Amennyiben az alkatrésznek nem határozzuk meg minden méretét, illetve szkennelés útján nem nyerünk belőle komplex CAD modellt, a végső geometria alakhelyes kialakítására az alkatrész vetületi fotóján látható élek és arányok

rekonstruálásával kerülhet sor. A feldolgozást segítheti az élek fotózás előtti színezése, ami világos alkatrészeknél pl. grafitporral, sötét gépelemeknél krétopporral megoldható. Fotózást követően még képmanipuláló programokkal (pl.: GIMP, PhotoShop) lehetséges az élek további kiemelése.

5.2. Feldolgozás CAD programban

Az előkészített és megfelelő képarányra vágott fotót egy arra alkalmas CAD szoftverben (pl.: Solid Edge, Creo) beállíthatjuk a szerkesztőfelület háttérképeként. Természetesen ekkor az alkatrész mérete még nincs meghatározva, ezért érdemes a fotót úgy körbevágni, hogy az minél jobban kitöltse a CAD program rajzterületét.

Ezt követően a látható vetület határoló görbéinek minél pontosabb átrajzolása következik. Ekkor a méretek még mindig rugalmasak és csak az alakhelyes vázlat megrajzolására törekszünk. Ebben a lépésben már felhasználjuk az alkatrész működéséből, illetve a hagyományos eszközökkel mérhető felületek méréséből származó információkat. Tehát amiről tudjuk, hogy pl. lekerekítés, azt nem tetszőleges szplájnnal közelítjük, hanem körívvel követjük le. Ugyanígy az egyenesek, a párhuzamosok és merőlegesek, az ismert szögek vagy éppen a koncentrikusság megtartása is az alkatrész funkcióinak ismeretéből következtetve, a mérnöki tapasztalataink útján állnak rendelkezésre. Az elkészült vázlaton érdemes jelölni az ismert méreteket, de nem kényszer szintű előírásként, hanem olyan rugalmas tájékoztató méretként, ami a szerkesztés további szakaszában szabadon változhat.

5.3. Skálázás

Miután elkészült az alakhelyes 2D vázlat, következik a folyamat kulcslépése: a skálázás. Minden CAD programban rendelkezésre áll olyan eszköz, ami a kijelölt rajzi elemeket képes úgy nagyítani és kicsinyíteni, hogy közben megtartja azok egymáshoz rögzített kapcsolatát.

Mivel egy ismert méretet tájékoztató méretként bejelöltünk, azt az eredeti alkatrész méréséből származó valós megfelelőjével elosztva meghatározhatjuk a nagyítás vagy kicsinyítés pontos arányszámát is, amit a skálázáshoz alkalmazva már megkaphatjuk a mérethelyes vetületet. Ebből a vázlatból kihúzás, vagy forgáskihúzás eszközzel elkészíthető a 3D testmodell, amelyen ezután további pontosításokat végezhetünk a korábbi méréseinket figyelembe véve.

5.4. Módosítás, áttervezés

Miután megkaptuk az eredeti alkatrész-geometriát, legyártás előtt még lehetőségünk van az alkatrész fejlesztésére. Akár VEM segítségével vizsgálatokat végezve, akár csak a várható terheléseket, a bekövetkezett meghibásodást, illetve az alkatrész számára a gépben rendelkezésre álló helyet figyelembe véve - többnyire anyaghozzáadással - erősíthetünk a tönkremenetel szempontjából kritikus keresztmetszeteken.

6. 3D NYOMTATÁS

Az elkészült CAD modellt a 3D nyomtató által kezelt fájlformátumra (pl: STL) történő konverztálás után gyártásra kész. Jelen esetben az egyik legelterjedtebb eljárásnak számító, filament szálként adagolt, hőre lágyuló polimer alapanyagot felhasználó FDM-nyomtatást vizsgáljuk.

6.1. Építési struktúra és szálorientáció

A kutatások rávilágítottak, hogy az alkatrészek felépítésének iránya, vagyis az, hogy a nyomtatási rétegek mely síkkal párhuzamosan követik egymást, releváns hatással bírnak a késztermék mechanikai tulajdonságaira. [3] Könnyű belátni, hogy egy olyan technológiánál, ahol a rétegek szétválása egy létező probléma, az azok mechanikus szétválasztását eredményező terhelési irányokat kerülni kell.

Ugyanígy a szálorientáció és a belső kitöltés mértéke is olyan paraméterek, amelyeket tudatosan kell megválasztanunk. A GAMF Anyagtechnológia Tanszékén végzett mérési sorozat eredményei szerint például a 45°-os szálorientáció minden mért esetben nagyobb ütő-hajlító szilárdsággal, nagyobb szakító szilárdsággal és nagyobb szakadási nyúlással rendelkező próbatesteket eredményezett. [4]

6.2. Anyagválasztás

Az FDM nyomtatás alapanyagának kiválasztása is döntő szempont, ha relatíve hosszú élettartamú termék készítése a cél. A leggyakrabban használt alapanyagok az ABS, ASA és PLA [5], illetve ezek adalékolt változatai. Ezek közül a könnyű (alacsonyabb hőmérsékletű) nyomtathatóságáról ismert PLA talán a legnépszerűbb. Persze ennek megfelelően a hőtűrése is a megszokottnál alacsonyabb, maximum 60°C-ra korlátozódik. Ezt szem előtt kell tartani olyan késztermékek nyomtatásánál, amelyek a beépítési helyükön, illetve működés közben ennél magasabb hőmérsékletnek lehetnek kitéve.

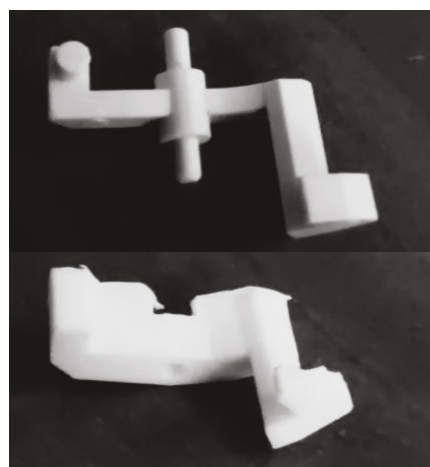
Megoldást jelenthet a CPLA (kristályos PLA), mely alapanyagot magasabb hőigényű termékekhez terveztek. A CPLA-ból nyomtatott munkadarabok hőállósága 80°C -ig terjed. [6]

Ha nagyobb igénybevételre számítunk, akkor a megnövelt mechanikai teljesítménnyel rendelkező TPLA (kemény PLA) jelent jó választást. A TPLA elnevezés talkummal adalékolt PLA-ra utal, ahol a talkum egy természetes ásvány, amely segít a PLA-nak keményebb anyag kialakításában. Így a könnyű nyomtathatóságot megőrizve kaphatunk megnövelt ütésállóságot, de csak a PLA-ra jellemző alacsonyabb hőállóság mellett. [7]

7. GYAKORLATI PÉLDÁK

7.1. Kapcsolókar

Az első példa egy olyan alkatrész rekonstrukcióját mutatja be, melynek beszerzésére nincs mód, hiszen az a szerkezet sem kifejezetten drága termék, ami ezt az elemet tartalmazza, így nem is biztosítanak hozzá pótalkarészt. Viszont a meghibásodás okának felismerését követően (a 3D nyomtatás elérhetősége miatt is) magától értetődő volt ennek a kis alapanyagigényű billenőelemnek a rekonstrukciója.



3.ábra.

Eredeti (felül) és áttervezett (alul) billenőkar

Ahogy az a 3. ábrán látható, az eredeti geometria ezen billenőkar esetében több átalakításon is átesett. Az eltört kis keresztmetszetű kar a rendelkezésre álló hely figyelembevételével maximális vastagságot kapott. További változtatás, hogy a gyári alkatrészen ugyanazon anyagból fröccsöntött forgástengely helyére egy azonos átmérőjű furat került, amibe később egy acél pálca illeszkedett, ezzel növelve a gépelem élettartamát. (4. ábra)



4.ábra.

Nyomatott billenőkar beépített állapotban

Az így módon előállított pótalkatrész esetén magától értetődő, mégis fontos kiemelni, hogy a várható terheléseket figyelembe véve fektetett állapotban célszerű nyomtatni. Tapasztalatként elmondható, hogy az így legyártott darab a beépítéstől számítva már egy éve folyamatosan és megfelelően működik.

7.2. Hűtőventilátor

Ennél a példánál nagyobb hőhatásnak van kitéve az érintett gépelem. A feladat érdekessége, hogy speciális tengely egy kapcsolatot kellett rekonstruálni. Az 5.ábrán látható kompresszor ventilátor egy forgattyús mechanizmus excentrikus tengelyvégre illeszkedő alkatrész.



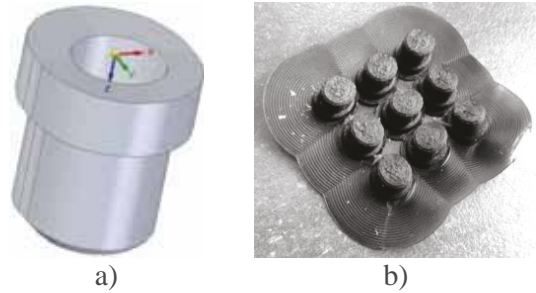
5.ábra.

Nyomatott ventilátor

Az ütésmentes járás érdekében a minél pontosabb furatpozíció meghatározása elengedhetetlen volt. Az agy merevítését szolgáló bordák kisebb átalakításon estek át annak érdekében, hogy a járókereket nagyobb alátéttel lehessen a helyén tartani. Mindezek eredményeként a termék időközönkénti használat mellett évek óta problémamentesen működik.

7.3. RC autó alkatrész

Az utolsó példa egy gyakran törő műanyag alkatrész, ami egy rádió távirányítású modellautó első lengővilla tengelyének játégmentes befogására szolgáló, egyik végén zárt hüvely. A futóműgeometria változtathatósága miatt a kialakítása nem szimmetrikus (5.a. ábra). A használati tapasztalat azt mutatja, hogy normál működés esetén hosszú élettartammal bír, ütközéskor viszont törőelemként megakadályozza a drágább alkatrészek sérülését.



6.ábra.

- a) Tengely pozícionáló hüvely CAD modellje
b) Több példányban nyomtatott pótalkatrészek

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Bihari Z; Sente J: Speciális geometriájú gépelemek rekonstrukciója, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye 1: 1pp. 143-150. (2011)
- [2] Sarka, F.; Tóbis, Zs.: A 3D scannelés és prototípusgyártás alkalmazási lehetősége csomagoló szerszámok gyártásában – esettanulmány, GÉP 68: 4 pp. 47-52. (2017)
- [3] Konya G.; Ficzer P.: The Effect of Layer Thickness and Orientation of the Workpiece on the Micro- and Macrogeometric Properties and the Machining Time of the Part during 3D Printing, Periodica Polytechnica-Mechanical Engineering 67: 2 pp. 143-150. 10.3311/PPme.21473, (2023)
- [4] Ádám B., Polgár B.: 3D nyomtatott próbatetek mechanikai vizsgálata, Gradus Vol 6, No 1 2019 185-191 ISSN 2064-8014
- [5] Marada I.; Bihari J.: A kisméretű műanyag fogaskerekek FDM és SLA elven történő 3D nyomtatása során szerzett tapasztalatok, GÉP 73: 3-4 pp. 60-65. (2022)
- [6] <https://www.ecopulppak.com/info/what-s-the-difference-between-pla-and-cpla-74277848.html> (2022.08.22)
- [7] <https://support.makerbot.com/s/article/1667337612208> (2023.09.29)

KAPCSOLÓMEZŐ AXIÁLIS MÉRETÉNEK MEGHATÁROZÁSA FERDE FOGÚ HENGERES KÜLSŐ FOGAZATÚ FOGAS- KERÉKPÁR KAPCSOLÓDÁSÁBAN

DETERMINING THE AXIAL SIZE OF THE CONTACT ZONE IN THE MESHING OF CYLINDRICAL EXTERNAL HELICAL GEARS

Drágár Zsuzsa, Dr. Kamondi László PhD
University of Miskolc, Institute of Machine and Product Design

ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány a ferde fogú hengeres külső fogazatú fogaskerékpárok kapcsolómezőjének tengelyirányú (axiális) méretének meghatározásával foglalkozik, általánosítva a kapcsolómező alakjától függetlenül. A nem szimmetrikus fogazatok jellemzője, hogy a szerszám alapprofil-szögeik nem azonosak. A fogaskerékpárok tervezésénél gyakori megoldási lehetőség, hogy a fogszélességek nem azonosak és nem egyenlőek a homloklapok közötti távolságok, tehát nem szimmetrikus az elrendezés. A szerelés következtében is lehet elhelyezkedési eltérés, de ez általában nem számottevő, de az alkalmazott módszer alkalmas e jelenség kezelésére is.

1. INTERPRETING THE TOP LAND MERIDIAN OF MESHING GEARS

The meshing gears determine the contact zone, its shape and the meshing characteristics with the meridian of the top land surface and their tooth widths [1, 2, 6, 7]. The top land meridians can map a regular square-shaped or different contact zone. Typical top land meridians are illustrated in Figure 1.

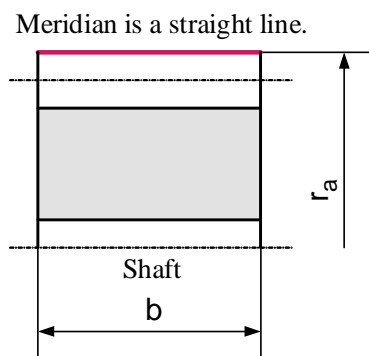


Figure 1. a)

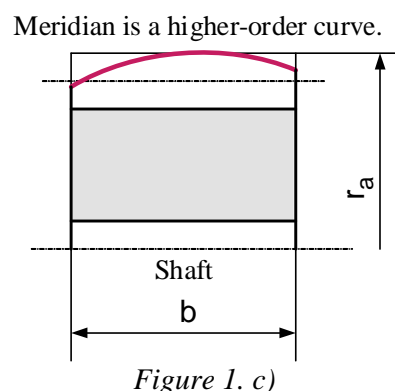
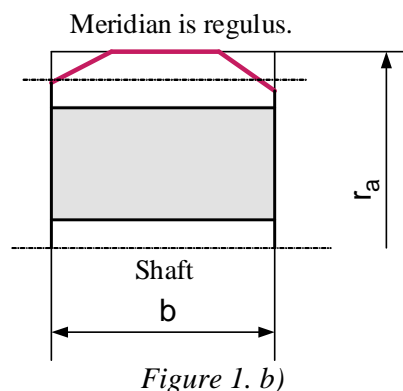


Figure 1. Possible cases of top land meridians

The Figure 1. a) shows a straight line parallel to the axis of rotation, which produces the well-known cylindrical gear body by rotating it around the axis. The Figure 1. b) shows that the meridian is created from straight lines forming an angle with the axis and rotates it. The Figure 1. c) applies an arbitrary higher-order curve and rotates it around the axis to create the top land surface. The top land surface of the meshing gears can be produced with different meridians. It always depends on which parameter of the contact zone needs to be optimized. The top land meridians determine the

shape of the contact zone [5]. The independent, straight meridian parallel to the axis forms a regular rectangular contact zone, the ones that differ from this form a generalized contact zone.

2. POSSIBLE RELATIVE POSITIONS OF THE GEARS

In addition to the top land meridians, the contact zone is also determined by the width of the gears and the position of the widths relative to each other [3]. In addition to the strength conditions, the width of the gears is also influenced by the manufacturing accuracy and the place of installation. Depending on the place of installation, whether the gear wheel is located as a console or between bearing supports can be characteristic. The width of the gears is often not the same either. Figure 2 shows an example of installation cases that also affect the width of the contact zone.

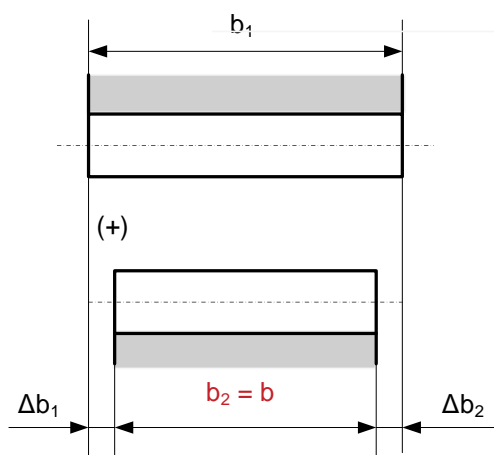


Figure 2.a) Drive gear is wider.

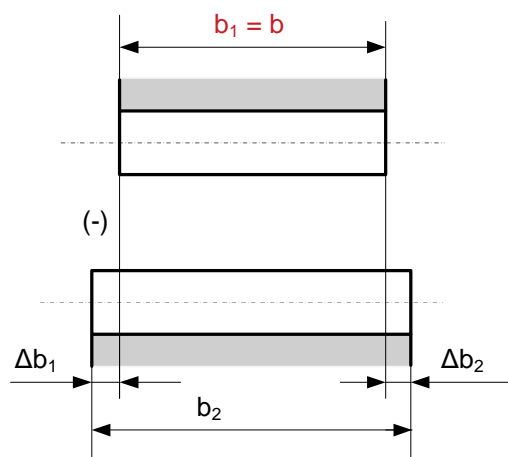


Figure 2. b) Drive gear is narrower.

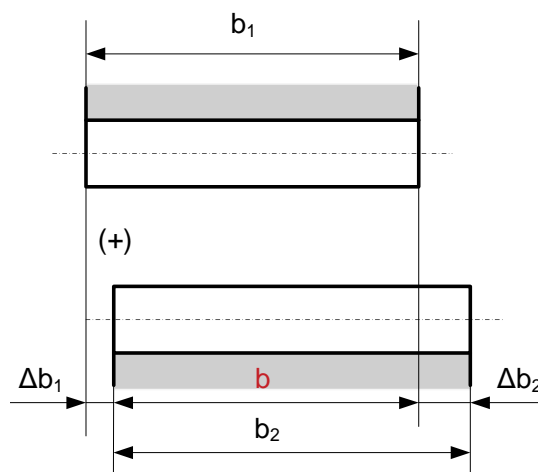


Figure 2. c) The gears are in any arrangement.

Figure 2. Arrangement cases of gears

3. GENERALIZED DEFINITION OF THE WIDTH OF THE CONTACT ZONE

An important part of the examination of the contact zone is the placement of the gear teeth geometry in the common contact zone [4]. On the one hand, this means determining the common width of contact zone depending on the arrangement. On the other hand, the derivative meridians must also be transformed into the contact zone, thus defining the lower and upper wrapping curves of the zone (zone lower border and zone upper border). Now we are only concerned with determining the common tooth width. For this, we introduce the coordinate system connected to gears (Figure 3).

Place a coordinate system $O_i(y_i, z_i)$ ($i = 1, 2$) for each gear at the intersection of the bisector of the width of the gears ($b_i/2$) and a component belonging to an arbitrary radius ($r_{a,i}$). The widths of gears b_i and the positioning parameter (placement size) Δb_1 can be found in the design drawing documentation. The three data determine the position of the gears in relation to each other, the opposite side deviation size Δb_2 , thus enabling a generalized test. The value of Δb_1 must be specified according to Figure 2, with the correct sign. The third coordinate system $O(y, z)$ should be located in half of the common tooth width ($b/2$) and on the component containing the pitch point (C).

Figure 2 also shows that

$$b_1 > b_2,$$

$$b_1 < b_2$$

base cases and $b_1 = b_2$ special situations may be the subject of the investigation.

Examining Figure 3, three additional basic cases can be distinguished, regardless of how the tooth widths are related to each other:

$$\Delta b_1 \leq 0 \quad (1)$$

$$0 < \Delta b_1 \leq |b_1 - b_2| \quad (2)$$

$$\Delta b_1 > |b_1 - b_2| \quad (3)$$

Examining the individual arrangement phases only for the basic case $b_1 > b_2$, the following relationships can be written. The parameters Δy_1 and Δy_2 represent the offset of the coordinate systems.

In the range $\Delta b_1 \leq 0$:

$$\Delta b_2 = b_1 - \Delta b_1 - b_2 \quad (4)$$

$$b = b_2 + \Delta b_1 \quad (5)$$

$$\Delta y_1 = 0,5 \cdot (b_1 - b) \quad (6)$$

$$\Delta y_2 = 0,5 \cdot (b - b_2) \quad (7)$$

$$\Delta y_{12} = |\Delta y_1| + |\Delta y_2| \quad (8)$$

In the range $0 < \Delta b_1 \leq |b_1 - b_2|$:

$$\Delta b_2 = b_2 + \Delta b_1 - b_1 \quad (9)$$

$$b = b_1 - (\Delta b_1 - \Delta b_2) \quad (10)$$

$$\Delta y_1 = 0,5 \cdot (b_1 - b) \quad (11)$$

$$\Delta y_2 = 0,5 \cdot (b - b_2) \quad (12)$$

$$\Delta y_{12} = |\Delta y_1| + |\Delta y_2| \quad (13)$$

In the range $\Delta b_1 > |b_1 - b_2|$:

$$\Delta b_2 = b_2 + \Delta b_1 - b_1 \quad (14)$$

$$b = b_1 - \Delta b_1 \quad (15)$$

$$\Delta y_1 = 0,5 \cdot (b_1 - b) \quad (16)$$

$$\Delta y_2 = 0,5 \cdot (b - b_2) \quad (17)$$

$$\Delta y_{12} = |\Delta y_1| + |\Delta y_2| \quad (18)$$

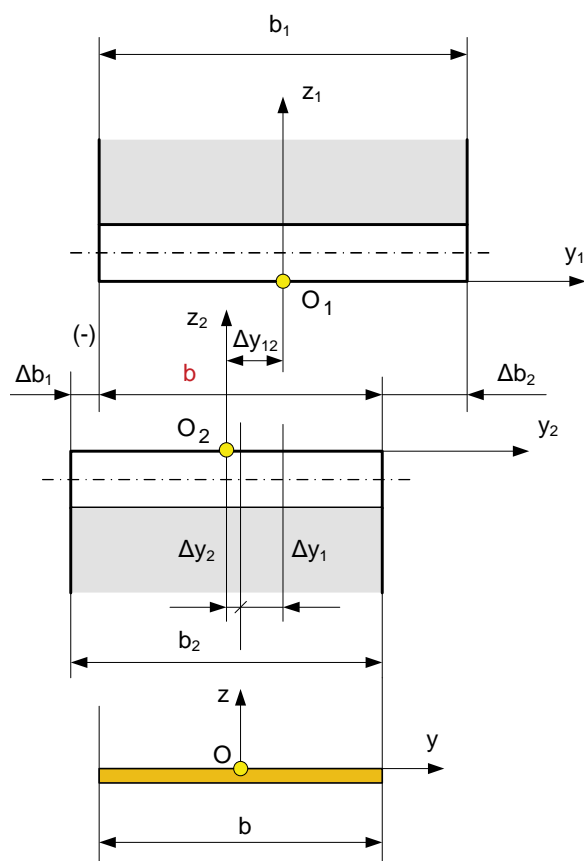


Figure 3. Interpretation of common tooth width

Table 1 illustrates the change of the common width of the contact zone in relation to the width of the gears.

Table 1. Change of the common tooth width

	$b_1 > b_2$	$b_1 < b_2$
$\Delta b_1 \leq 0$	$b < b_2$	$b < b_1$
$0 < \Delta b_1 \leq b_1 - b_2 $	$b = b_2$	$b = b_1$
$\Delta b_1 > b_1 - b_2 $	$b < b_2$	$b < b_1$

The character of the change of the common tooth width and the coordinate shifts is clearly shown by the gear pair, where the tooth widths (b_1, b_2) and the positioning parameter (Δb_1) can be changed (Table 2). The quantities in the table are in mm.

4. CONCLUSION, RESULTS

The article presented the determination of the axial size (common tooth width) of the contact zone depending on the installation arrangement of cylindrical external gears with helical teeth. Knowledge of the width of the contact zone is necessary to examine changes in the zone. The

additional boundary elements of the contact zone (lower and upper wrapping curves) are determined by the top land meridians. The coordinate systems connected to the gears are not the same as the coordinate system of the contact zone, so it was necessary to determine the ex-

tent of the displacements so that the necessary analyses could be performed automatically with the knowledge of the construction drawings. The presented figures and revealed connections significantly help this work.

Table 2. Example for change of common tooth width

	$\Delta b_1 \leq 0$					$0 < \Delta b_1 \leq b_1 - b_2 $			$\Delta b_1 > b_1 - b_2 $	
b_1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
b_2	80	80	80	100	100	80	80	80	80	80
Δb_1	-5	-2	0	-2	0	10	15	20	30	30
Δb_2	25	22	20	2	0	-10	-5	0	10	10
b	75	78	80	98	100	80	80	80	70	70
Δy_1	12,5	11	10	1	0	10	10	10	15	15
Δy_2	-2,5	-1	0	-1	0	0	0	0	-5	-5
Δy_{12}	15	12	10	2	0	10	10	10	20	20

5. REFERENCES

- [1] Graf, H.-CHR. (1965). Die Entwicklung der Zahrad-Technik. Springer-Verlag. Berlin. P.: 1/532.
- [2] Erney, Gy. (1983). Fogaskerekek. Műszaki Könyvkiadó. Budapest.
- [3] Litvin, F. L. (1972). A fogaskerékkapcsolás elmélete. Műszaki Könyvkiadó. Budapest.
- [4] Niemann, G., Winter, H. (1983). Maschinenelemente. Band II. Zweite Auflage. Springer Verlag. Berlin. P: 1/376.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-17468-1>
- [5] Drágár, Zs., Kamondi, L. (2018). A fogalak szerepe a fogazott elemárokat tartalmazó hajtásláncokban. In: Csibi, Vencel-József; Barabás, István (szerk.). OGÉT 2018: XXVI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia: 26th International Conference on Mechanical Engineering.: OGÉT 2018. Marosvásárhely, Románia: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) 544 p., pp. 232-235., 4 p.
- [6] Roth, K. (1989). Zahnradtechnik. Band I. Stirnradverzahnungen-Profilverschiebungen, Toleranzen, Festigkeit. Springer Verlag. P.: 1/250.
- [7] Roth, K. (1989). Zahnradtechnik. Band II. Stirnradverzahnungen-Geometrische Grundlagen. Springer Verlag. P.: 1/247.

FUNKCIONÁLISAN GRADIENS ANYAGÚ BIMODULUSÚ TÉGLALAP KERESZTMETSZETŰ GÖRBE RÚD HAJLÍTÁSA

BENDING OF CURVED BEAM WITH RECTANGULAR CROSS SECTION MADE OF DOUBLE MODULUS FUNCTIONALLY GRADIENT MATERIAL

*Ecsedi István, Professor Emeritus, Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet;
Baksa Attila, egyetemi docens, PhD, Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet;
Habbachi Marwen, PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet*

ÖSSZEFOGLALÓ. A tanulmány tárgyát téglalap keresztmetszetű állandó görbületű funkcionálisan gradiens bimodulusú rúd tiszta hajlítási feladata alkotja. A rúd anyagának rugalmassági modulusa húzásra és nyomásra a radiális koordináta előírt függvénye. A semleges réteg pozícióját a geometriai méretek és a radiális normál feszültség-radiális fajlagos nyúlás kapcsolatát megadó függvény kettős határozza meg. A dolgozat megadja a radiális és a tangenciális normál feszültségek képleteit, a von Mises feszültség formuláját, továbbá a radiális és tangenciális elmozdulásokat, valamint a keresztmetszetek szögelfordulását. A kidolgozott analitikus módszer alkalmazását egy példa szemlélteti.

SUMMARY: The object of this study is the bending problem of curved beam with rectangular cross section made of functionally graded material with double modulus. The modulus of elasticity of the material of curved beam for tension and compression are the prescribed functions of the radial coordinate. The position of the neutral layer is determined by the geometric dimensions and the functions defining the relationship between the normal stress and normal strain. The paper gives the formulae for the radial and circumferential normal stresses, as well as the radial and circumferential displacements, as well as the angular rotations of cross sections. The application of the developed analytical method is illustrated by a numerical example.

Keywords: Saint-Venant bending, double modulus, functionally gradient material.

1 INTRODUCTION

Already de Saint-Venant had noted, that certain materials behave differently under tension and compression [1]. In the case of small deformations for tension and compression linear functions give the relationship between the normal stress and normal strains. (see Figure 1). The following

constitutive law is valid for elastic materials with double Young modulus

$$\sigma = E_1 \varepsilon \quad \varepsilon > 0 \quad \sigma = E_2 \varepsilon \quad \varepsilon \leq 0 \quad (1)$$

where σ is the normal stress, ε is the normal strain, E_1 and E_2 are the normal moduli of elasticity.

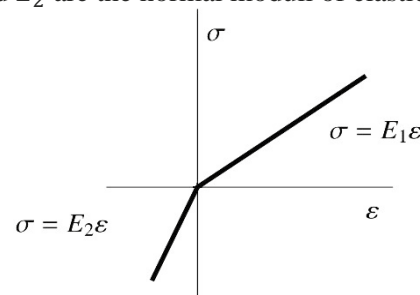


Figure 1 Stress-strain diagram.

Book of Ambartsumyan deals with the solutions for many problems of beams, disks, plates and shells [3]. Cited book of Ambarsumyan uses such constitutive law which satisfies the following symmetry conditions

$$\frac{\nu_1}{E_1} = \frac{\nu_2}{E_2}. \quad (2)$$

In equation (2) ν_1 and ν_2 are the Poisson number. Timoshenko gives the solution of bending problem for beam with straight axis [2]. The text book by Timoshenko presents closed form solution for pure bending which can be extended to nonhomogeneous bending assuming that the bending moment has constant sign, that is on the whole beam $M \geq 0$ or $M \leq 0$. This paper deals with the pure bending of curved beam made of functionally grade material with double Young modulus. The material property is a second order power function of the radial coordinate r . The computations are done in the cylindrical coordinate system $Or\varphi z$, r denotes the radial coordinate, φ is the polar angle and z is the axial coordinate. The unit vectors of the cylindrical coordinate system $Or\varphi z$ are $\mathbf{e}_r(\varphi)$, $\mathbf{e}_\varphi(\varphi)$ and \mathbf{e}_z (see Figure 2).

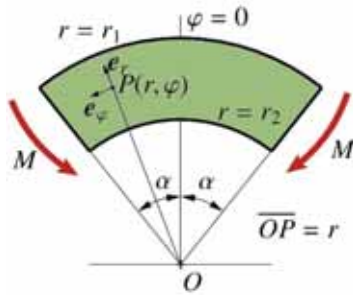


Figure 2 Pure bending of curved beam made of FG material with double modulus.

The thickness of the curved beam measured in direction of axis z is $b = \text{const}$. The Young moduli of the beam are denoted by E_1 and E_2

$$E_1 = Y_1 \left(\frac{r}{r_1} \right)^2, \quad E_2 = Y_2 \left(\frac{r}{r_2} \right)^2, \quad (3)$$

where Y_1 and Y_2 are the Young moduli at $r = r_1$ and at $r = r_2$ respectively. On the upper part of the curved beam $\sigma_r > 0$, and on the lower part of the curved beam $\sigma_r < 0$. The position of the neutral layer is determined by the radial coordinate ρ ($r_2 \leq \rho \leq r_1$).

It is evident that $\varepsilon_\varphi(\rho) = 0$ and $\sigma_\varphi(\rho) = 0$. The circumferential normal strain $\varepsilon_\varphi = \varepsilon_\varphi(r)$ can be represented as according to paper [4]

$$\varepsilon_\varphi = \frac{W}{r} + \vartheta, \quad W = \frac{d^2 U}{d\varphi^2} + U, \quad \vartheta = \frac{d\phi}{d\varphi}. \quad (4)$$

Here, $U = U(\varphi)$ is the radial displacement, $\phi = \phi(\varphi)$ is the rotation of the cross section. The possibility of the strain field given by equation (4) follows from the following displacement field

$$\mathbf{u}(r, \varphi, z) = U(\varphi)\mathbf{e}_r + (r\phi(\varphi) + V(\varphi))\mathbf{e}_\varphi \quad (5)$$

where $U = U(\varphi)$ is the radial displacement, $V = V(\varphi) = \frac{dU}{d\varphi}$ is the one of the component of circumferential displacement and $\phi = \phi(\varphi)$ is the cross sectional rotation [4]. All the strains, except for the circumferential normal strain ε_φ are zero. It is evident, in the case of pure bending ε_φ , W and ϑ do not depend on the polar coordinate φ , so that

$$\sigma_{\varphi 1}(r) = Y_1 \left(\frac{r}{r_1} \right)^2 \vartheta \left(1 - \frac{\rho}{r} \right) \quad \rho \leq r \leq r_1 \quad (6)$$

$$\sigma_{\varphi 2}(r) = Y_2 \left(\frac{r}{r_2} \right)^2 \vartheta \left(1 - \frac{\rho}{r} \right) \quad r_2 \leq r \leq \rho. \quad (7)$$

since $W = -\vartheta\rho$. The following conditions of the global equilibrium are valid

$$N = b \int_{r=\rho}^{r_1} \sigma_{\varphi 1} dr + b \int_{r=r_2}^{\rho} \sigma_{\varphi 2} dr = 0, \quad (8)$$

$$M = b \int_{r=\rho}^{r_1} r \sigma_{\varphi 1} dr + b \int_{r=r_2}^{\rho} r \sigma_{\varphi 2} dr. \quad (9)$$

2 SOLUTION OF THE PURE BENDING PROBLEM OF CURVED BEAM

At first, we give the detailed form of equation (8) which is

$$\begin{aligned} & \int_{r=\rho}^{r_1} E_1 \left(1 - \frac{\rho}{r} \right) dr + \int_{r=r_2}^{\rho} E_2 \left(1 - \frac{\rho}{r} \right) dr = \\ & = \int_{r=\rho}^{r_1} Y_1 \left(\frac{r}{r_1} \right)^2 \left(1 - \frac{\rho}{r} \right) dr + \\ & \int_{r=r_2}^{\rho} Y_2 \left(\frac{r}{r_2} \right)^2 \left(1 - \frac{\rho}{r} \right) dr = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

After some elementary computations equation (10) can be written in the form

$$\begin{aligned} & \left(\frac{Y_1}{r_1^2} - \frac{Y_2}{r_2^2} \right) \rho^3 + 3(Y_2 - Y_1) + 2(Y_1 r_1 \\ & - Y_2 r_2) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

The root of equation (11) which satisfies the condition $r_2 \leq \rho \leq r_1$ gives the position of the neutral layer. We note that ρ does not depend on the value of the applied bending moment.

Moment equilibrium equation can be written the following form

$$M = \vartheta Q, \quad (12)$$

where

$$\begin{aligned} Q = & Y_1 b \left(\frac{1}{12} \frac{\rho^4}{r_1^2} + \frac{1}{4} r_1^2 - \frac{1}{3} r_1 \rho \right) \\ & - Y_2 b \left(\frac{1}{12} \frac{\rho^4}{r_2^2} + \frac{1}{4} r_2^2 \right. \\ & \left. - \frac{1}{3} r_2 \rho \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Expression of the circumferential normal stress can be given as

$$\sigma_{\varphi 1}(r) = E_1(r)\vartheta \left(1 - \frac{\rho}{r} \right) \quad \rho \leq r \leq r_1, \quad (14)$$

$$\sigma_{\varphi 2}(r) = E_2(r)\vartheta \left(1 - \frac{\rho}{r} \right) \quad r_2 \leq r \leq \rho, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\varphi(r) = & (h(r - r_2) - h(r - \rho))\sigma_{\varphi 2}(r) \\ & + h(r - \rho)\sigma_{\varphi 1}(r), \end{aligned} \quad (16)$$

Here, $h = h(r)$ is the Heaviside function

$$h(r) = 0 \quad r < 0, \quad h(r) = 1 \quad r \geq 0. \quad (17)$$

To obtain the formula of radial normal stress σ_r the following equilibrium equation is used [5,6]

$$\frac{d}{dr}(r\sigma_r) = \sigma_\varphi. \quad (18)$$

The solution of the ordinary differential equation for $\sigma_r = \sigma_r(r)$ is

$$\sigma_{r2}(r) = \frac{1}{r} \int_{r_2}^r \sigma_{\varphi2}(\lambda) d\lambda, \quad r_2 \leq r \leq \rho, \quad (19)$$

$$\sigma_{r1}(r) = \frac{1}{r} \int_{\rho}^{r_1} \sigma_{\varphi1}(\lambda) d\lambda + \frac{\rho}{r} \sigma_{r2}(\rho) \quad (20)$$

$$\rho \leq r \leq r_1.$$

Expression of von Mises stresses σ_0 can be computed from equation (21) [5,6]

$$\sigma_0(r) = \sqrt{\sigma_r^2 - \sigma_r \sigma_\varphi + \sigma_\varphi^2} \quad r_2 \leq r \leq r_1. \quad (21)$$

The connection between the radial displacement $U = U(\varphi)$ and W is

$$W = \frac{d^2U}{d\varphi^2} + U. \quad (22)$$

The circumferential displacement in terms of $U = U(\varphi)$ is

$$V(\varphi) = \frac{dU}{d\varphi}. \quad (23)$$

The solution of the differential equations (22) and (23) under the condition (Figure 2)

$$U(0) = 0, \quad V(0) = 0 \quad (24)$$

are

$$U(\varphi) = W(1 - \cos \varphi), \quad V(\varphi) = W \sin \varphi \quad (25)$$

$$-\alpha \leq \varphi \leq \alpha$$

From equation (4) the expression of cross-sectional rotation can be computed (Figure 2)

$$\phi(\varphi) = \vartheta \varphi \quad -\alpha \leq \varphi \leq \alpha. \quad (26)$$

Here, it is assumed that $\phi(0) = 0$.

3 NUMERICAL EXAMPLE

The following data are used in the numerical example

$$Y_1 = 4 \times 10^{10} \text{ Pa}, \quad Y_2 = 5 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$r_1 = 0.065 \text{ m}, \quad r_2 = 0.085 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{6}, \quad b = 0.02 \text{ m}, \quad M = 500 \text{ Nm}.$$

Figure 3 shows the plot of the circumferential normal stress σ_φ as a function of r .

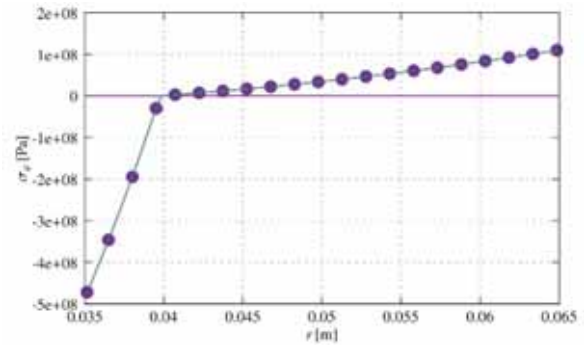


Figure 3 The graph of the circumferential normal stress.

The plot of the radial normal stress as a function of r is presented in Figure 4.

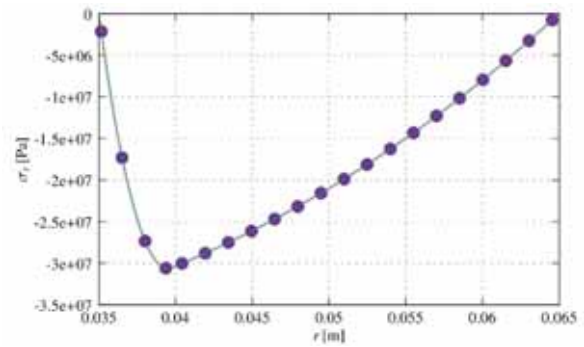


Figure 4 The plot of the radial normal stress.

The distribution of the von Mises stress is given by Figure 5.

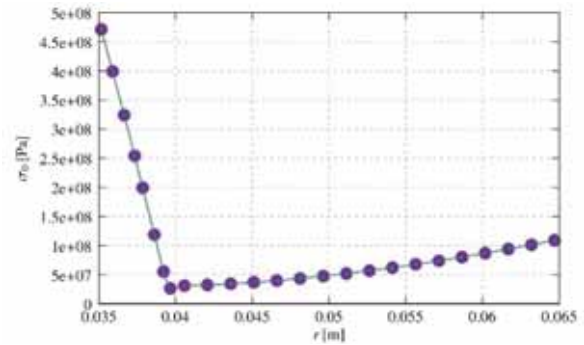


Figure 5 The plot of $\sigma_0 = \sigma_0(r)$.

The maximum value of σ_0 is $\sigma_0(r_2) = 4.7600127 \times 10^8 \text{ Pa}$. The plot of the radial displacement as a function of φ is presented in Figure 6.

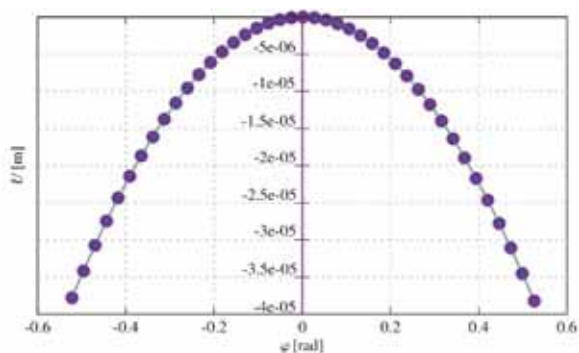


Figure 6 The graph of the $U = U(\varphi)$.

The plot of $V = V(\varphi)$ is illustrated in Figure 7.

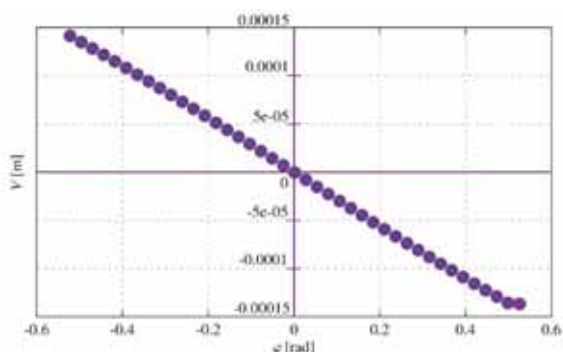


Figure 7 The plot of $V = V(\varphi)$.

The cross sectional rotation of curved beam as a function of φ is given in Figure 8.

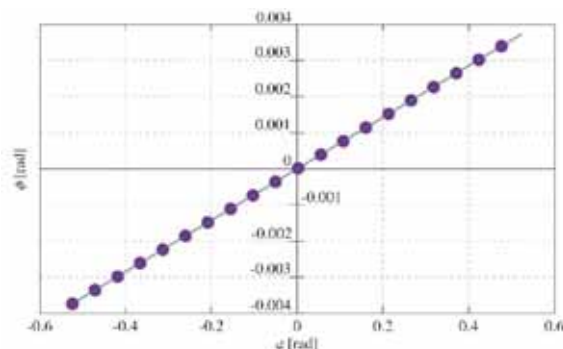


Figure 8 The plot of the cross sectional rotation $\phi = \phi(\varphi)$.

5 CONCLUSIONS

The paper deals with the pure bending of curved beam with rectangular cross section. The beam is made of functionally graded bimodulus material. The moduli of elasticity, which are different for tension and compression depend on the radial coordinate. The presented solution is obtained by the application of a strength of material formulation.

6 REFERENCES

- [1] de Saint-Venant B., *Résumé Des Leçons Données À École Des Ponts Et Chaussées Sur L'application De La Mécanique Des Machines*, 3rd ed., Dunod Paris, France, 1864, Vol. 1., Chapter I-IV., pp. 173-178.
- [2] Timoshenko, S.P., *Strength of materials, Part II*, 3rd ed., Mc Millan, London, UK, 1956, Chapter IX., p. 336.
- [3] Ambartsumyan, S.A., *Elasticity Theory of Different Moduli*. Moscow, Nauka, Fiziko-Matematicheskoy Literatury, 1982.
- [4] Ecsedi, I., Dluhi, K., A linear model for the static and dynamic analysis of non-homogeneous curved beams. *Applied Mathematical Modelling*, 29, (2005), pp. 1211-1231.
- [5] Hosford, W., *Solid Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, 2010.
- [6] Rees, D.W.A., *Basic Solid Mechanics*. Macmillan Press, London, 1997.

A VASALÁSI PARAMÉTEREK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATÁHOZ HASZNÁLT SEM FELVÉTELEK ELEMZÉSE CAD RENDSZER SEGÍTSÉGÉVEL

ANALYSIS OF SEM IMAGES USED TO INVESTIGATE THE EFFECT OF IRONING PARAMETERS BY CAD SOFTWARE

Dr. Ficzer Péter, egyetemi docens, László Noémi, PhD hallgató, SEM Laborvezető

ABSTRACT

The use of additive manufacturing in the automotive industry is becoming more and more widespread, thanks to the speed and relative simplicity of the technology, and the fact that it can be used to produce parts with more complex geometries that are not possible with conventional processes. This is particularly true for surface modified or structured plastic parts. Many instrumental, analytical and even image analysis methods are available for the qualitative and quantitative characterisation of surface structure. This paper describes the possibilities of image analysis using scanning electron microscopy (SEM) and CAD.

1. BEVEZETÉS

Az ipar 4.0 napjainkban egyre több területen elvárt bevezetése sok nehézséget okoz. Az ipar 4.0 számos feltételt támaszt elénk, melyek közül ha csak az egyedi igényeknek és a gyors válaszadásnak, megoldásnak való megfelelésre gondolunk akkor is egyértelművé válik az additív gyártástechnológiák alkalmazásának szükségessége. Az additív gyártástechnológiák szerepe az utóbbi időkben jelentősen megváltozott, már nem csak marketing eszközként, gyors-prototípus gyártó eljárásaként tekintünk rá. Ennek megfelelően a minőséggel szemben támasztott követelmények is megváltoztak. Komoly kritériumokat támasztunk a megfelelő geometriai kialakításon túl a méretpontossággal, a szín-, a formavilág -, a tapintás -, és anyag tekintetében történő megfelelésre is, csakúgy, mint a megfelelő terhelhetőségre. Ez azt eredményezte, hogy egy additív gyártásterületén dolgozó szakembernek mára sokkal átfogóbb tudással kell rendelkeznie, mint korábban. Könnyen belátható, ha csak a megfelelő terhelhetőségre gondolunk, akkor ma már elengedhetetlen, az additív gyártástechnológiák sajátosságainak, előnyeinek kihasználására fejlesztett és a mesterséges intelligenciával támogatott generatív design alkalmazásának szükségessége [1], [2]. Az additív gyártástechnológiák által létrehozott alkatrészek felületei nem feltétlenül elégítik ki a műszaki

életben elvárt igényeket, ezért gyakran valamilyen felületjavító eljárásra van szükség. Ezen eljárások ugyanakkor nem csak a felületminőséget módosítják, hanem az anyag morfológiáját is. Emiatt fontos meghatározni, hogy az egyes eljárások paramétereinek milyen hatása van a felületminőségre és a morfológiai változásokra. A célként megfogalmazott egyenletes felületminőségek elérése különösen nehéz feladat a rétegről-rétegre való építkezéssel előállított alkatrészek esetében, ahol a gyártástechnológiából adódóan a különböző irányokban eltérő anyagjellemzőkkel és felületminőségekkel rendelkeznek az alkatrészek.

A felületmódosító eljárások alkalmazása egyre inkább elterjed az additív gyártástechnológiával előállított alkatrészek esetén. Az additív gyártás vagy 3D-nyomtatás innovatív módszerekkel készíti el az alkatrészeket rétegről rétegre. Ezek az alkatrészek gyakran különböző funkcionális és esztétikai követelményeknek kell megfeleljenek, és ezen követelmények kielégítése érdekében felületmódosító eljárásokat alkalmaznak.

Ezek az eljárások lehetnek kémiai, mechanikai vagy fényáteresztők, és a céljuk lehet a mechanikai tulajdonságok javítása, a felszín simítása vagy a műszaki tulajdonságok módosítása. Például a felületkezelés során bevonatokat lehet felvinni az alkatrészekre, ami növeli a kopásállóságot vagy a korrózióállóságot. Ezenkívül a lézerrel történő felületkezelés és az elektrokémiai eljárások használata is terjedőben van az additív gyártásban. Az ismertebb felületjavító eljárások a forgácsolás [3], [4], hengerlés, bevonatolás és a vasalás [5].

Jelen tanulmányban a FFF (Fused Filament Fabrication) technológia esetén alkalmazott vasalási eljárás paramétereinek a felületminőségre gyakorolt hatását vizsgáltuk. A vasalási eljárás lényege, hogy miután elkészültünk egy adott darab nyomtatásával a legfelső rétegen újra "átmegyünk", úgy, hogy a fúvóka hőmérsékletét megtartjuk, de abból nem, vagy csak nagyon kevés anyagot juttatunk a felületre. Ezáltal a nagy hőmérséklet (és nagyon kis mennyiségű anyag)

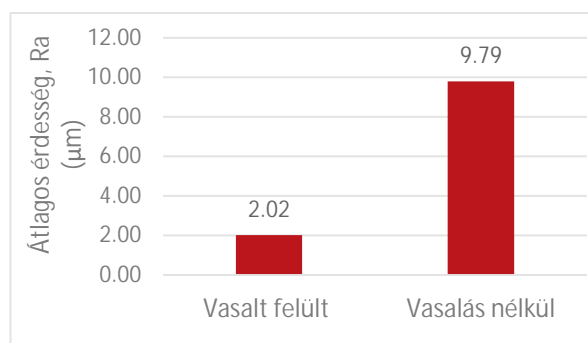
hatására a felület elvileg jobban összeolvad a hézagok kitöltése jobb lesz, a felület “simább” és tömörebb lesz.

A vizsgált paraméterek:

- vasalási sebesség,
- anyaghozzáadás mértéke,
- a fúvóka által bejárt szerszám pályák egymástól való távolsága.

A próbatestek 10 mm élhosszúságú kockák voltak, PLA alapanyagból.

Korábbi vizsgálatainkból kiderült [6], hogy a felületi érdesség a vasalási eljárásnak köszönhetően jelentős mértékben csökkenthető, ahogy ez az 1. ábrán is látható.



1. ábra. Vasalt és vasalatlan felületek összehasonlítása [6]

Mivel a felületi érdesség és a méretpontosság (tűrések) között egyértelmű összefüggés van kijelenthető, hogy a vasalt felületekkel akár 4 tűrésfokozati osztállyal (IT, International Tolerances) pontosabb darabokat lehet elérni. Megállapítható volt továbbá, hogy a vasalási sebesség növelésével növekszik a felületi érdesség is, a növekedés mértéke nem jelentős. Ezen kívül kijelenthetjük, hogy minél kisebb a lerakott anyagmennyiség a vasalási eljárás során, annál jobb felületi minőséget kapunk. Ugyanakkor látni kell azt is, hogy ennek jelentősége sem számottevő. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy minél kisebb a vasalási távolság a vasalás során, annál hatékonyabb az eljárás. Ezen vizsgálatokat Keyence VR-5000-es mikroszkóppal végeztük.

Az így kapott eredményeken túl azt kívántuk megvizsgálni, hogy a vasalás során milyen mértékben változik meg a vasalt réteg mélységi irányban. Ehhez pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket készítettünk.

2. MÓDSZERTAN

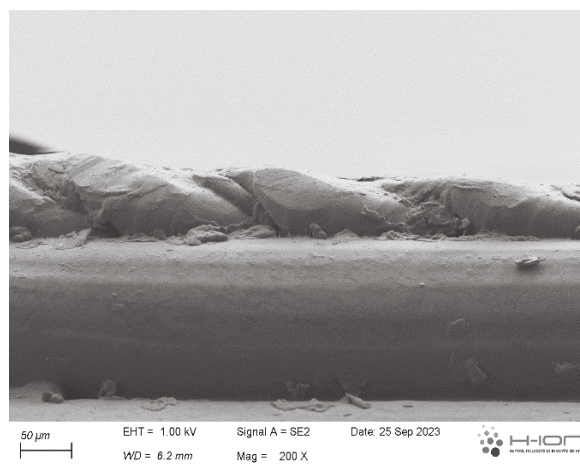
A vasalt réteg vastagságának gyártási paramétereiktől való függésének meghatározásához különböző beállításokkal készítettük el a próbadarabokat. A 2. ábrán láthatjuk a vizsgálati paramétereket. A vizsgálathoz szükséges felvételeket egy Zeiss Sigma 300 téremissziós

pásztázó elektronmikroszkóppal (FE-SEM) végeztük.

	Vasalási sebesség (mm/s)	Vasalási távolság (mm)	Térfogatáram (%)	Rétegvastagság (mm)	Vasalt réteg
1	20	0.1	5	0.2	Felső réteg
2	80	0.1	5	0.2	Felső réteg
3	20	0.4	5	0.2	Felső réteg
4	20	0.1	20	0.2	Felső réteg
5	20	0.1	5	0.3	Felső réteg
6	20	0.1	5	0.4	Felső réteg
7	20	0.1	5	0.2	Minden réteg

2. ábra. Vizsgálati paraméterek a vasalt réteg vastagságának meghatározásához.

A. A 3. ábrán egy vasalt rétegről készült SEM (Scanning electron Microscope) felvétel látható, az egyik próbatest esetén.

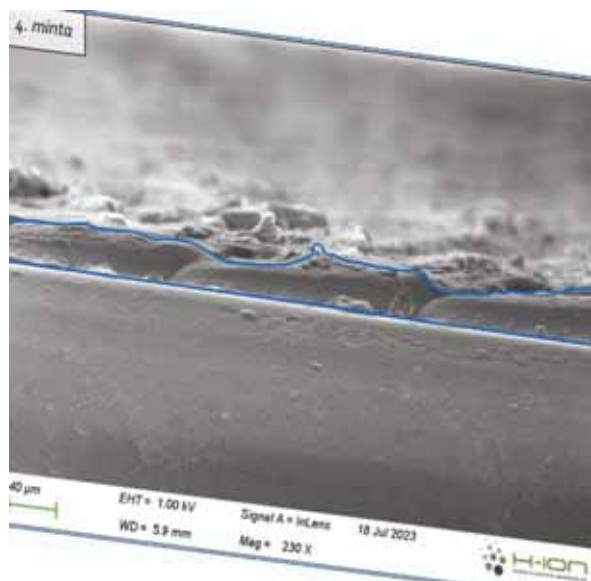


3. ábra. SEM felvétel egy vasalt rétegről

Az ábrán jól megfigyelhető, hogy az így kapott felületi réteg vastagsága nem egyenletes. Van lehetőség több helyen mérni, esetleg egy vizsgált alaphosszon egyenlő osztásokban vizsgálni a rétegmagasságot, ahogy azt az átlagos felületi érdesség esetében is tesszük, de egyértelmű, hogy az átlagunk függ attól, hogy hol mérünk. Persze minél több helyen mérünk, annál pontosabb választ kapunk az átlagos rétegvastagságra.

A mai CAD rendszerek lehetővé teszik, hogy zárt görbék által határolt területekről azonnal kinyerjünk minden terület információt (terület nagysága, súlypontja, másodrendű nyomatékok, stb.) Így megtehetjük, hogy a vizsgálat céljából készített SEM képeket, háttérként beillesztjük egy vázlat síkjára. Következő lépésként, a SEM felvételeken látható lépték alapján a képet átméretezzük, hogy azt valódi nagyságban lássuk. Ezután körberajzoljuk a vizsgált réteget, ahogy az a 4. ábrán is látható. Fontos megjegyezni, hogy ez a módszer csak akkor alkalmazható, ha a minta maga sík felületekkel rendelkezik. Egy ellenőrzési

lehetőség, hogy a vasalt felület alatti, elvileg ismert rétegvastagságot is lemérjük.



4. ábra. CAD rendszerben körbe rajzolt vasalt réteg

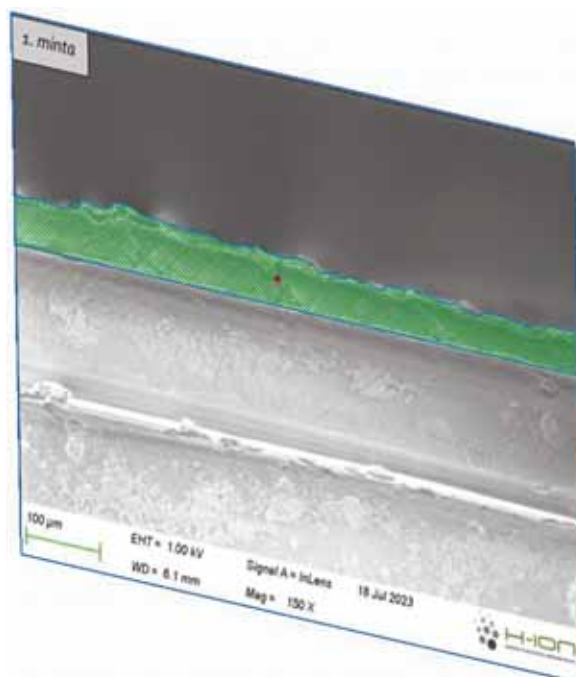
Az 5. ábrán is megfigyelhető, hogy az alap gyakorlatilag egy egyenessel is jól közelíthető, míg a felső réteget csak legalább harmadfokú NURBS (Non Uniform Rational Bezier Spline) görbével tudjuk közelíteni.



5. ábra. NURBS görbével közelített határa a vasalt felületnek

A vizsgált hossz elején és végén az alapra merőleges egyenesekkel zárta tesszük a vizsgált részt. Így, megkapjuk a vizsgált hosszt és a vizsgált terület nagyságát, ahogy ez a 6. ábrán is látható.

Ezekből az információkból könnyen kiszámíthatjuk, hogy amennyiben tökéletes lenne a felületünk - egy téglalap lenne a körbezárt terület -, akkor ennek a téglalagnak mekkora lenne a magassága. Ez a magasság pedig megegyezik a vizsgált vasalt réteg átlagos magasságával.



6. ábra. Görbékkel határolt területinformációk kinyerése CAD szoftver segítségével

A bemutatott eljárással minden beállítási paraméter esetében megvizsgáltuk a darabokat és meghatároztuk a vasalt rétegek átlagos vastagságát.

3. EREDMÉNYEK

A különböző gyártási - és vasalási paraméterek mellett mért átlagos mélysége a vasalt rétegnek látható a 7. ábrán. A 2. ábrán látható, a sorszámoknak megfelelő beállításokhoz tartozó vizsgálati alaphossz, terület és az ebből adódó vasalt réteg mélysége olvasható ki az ábrából.

	Vizsgálati alaphossz (µm)	Vizsgált terület (µm ²)	Vasalt réteg mélysége (µm)
1	764.25	34420.95	45.04
2	228.2	2700.91	11.84
3	229.3	485.2	2.12
4	505.05	15687.26	31.06
5	229.42	7650.36	33.35
6	1618.56	193374.9	119.47
7	763.5	47460.71	62.16

7. ábra. Vizsgálati eredmények CAD szoftverből a SEM képek alapján

4. ANALÍZIS

Az érdemi eredményeket összefoglalva láthatjuk a 8. ábrán.

	Vasalási sebesség (mm/s)	Vasalási távolság (mm)	Térfogatár am (%)	Rétegvastagság (mm)	Vasalt réteg	Vasalt réteg mélysége (μm)
1	20	0.1	5	0.2	Top layer	45.04
2	80	0.1	5	0.2	Top layer	11.84
3	20	0.4	5	0.2	Top layer	2.12
4	20	0.1	20	0.2	Top layer	31.06
5	20	0.1	5	0.3	Top layer	33.35
6	20	0.1	5	0.4	Top layer	119.47
7	20	0.1	5	0.2	Every layer	62.16

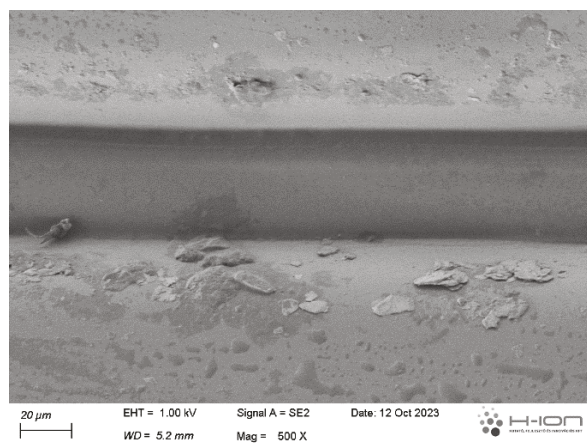
8. ábra. Vasalási réteg mélysége a vasalási paraméterek függvényében

Az eredményeket megvizsgálva megállapítható, hogy:

- a vasalási sebesség növelésével a vasalt réteg mélysége csökken,
- a vasalási távolság növelésével a vasalt réteg mélysége csökken,
- a térfogatáram növelésével a vasalt réteg mélysége csökken,
- minden réteg vasalása esetén a vasalt réteg mélysége nő.

A nyomtatási rétegvastagság függvényében a vasalt réteg mélységének meghatározása során ellentmondásra jutottunk, így ez további, megismételt vizsgálatokat igényel.

A 9. ábrán a rétegek közti vasalt réteg is jól látható.



9. ábra. Nyomtatott rétegek közti vasalt réteg SEM képe

ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálatok eredményeit figyelembe véve megállapítható, hogy a vasalási paramétereknek jelentős hatása van a vasalt réteg mélységére.

Fontos megjegyezni, hogy jelen vizsgálat során csak egy vonal menti vizsgálatot végeztünk, ezért a pontosabb és megbízhatóbb eredmények

érdekében érdemes lehet több keresztmetszetben vett értékeket is megvizsgálni.

Az eredmények megbízhatóságának növelése érdekében a továbbiakban CT (Computer Tomography) vizsgálatokat is végezni fogunk.

Az eredményeknek – a vasalt rétegek mélységének - feltételezhetően jelentős hatása van a mechanikai tulajdonságokra is, ezért kutatásunkat ilyen irányban folytatjuk.

IRODALOM

- [1] Takacs, A.: Safe In and Out of the Car. In: Jármű, K., Cservenák, Á. (eds) Vehicle and Automotive Engineering 4. VAE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_6
- [2] Borsodi, E., Takács, Á.: Generative Design: An Overview and Its Relationship to Artificial Intelligence, Design of Machines and Structures 12 : 2 pp. 54-60., (2022), <https://doi.org/10.32972/dms.2022.013>
- [3] Kónya, G., Ficzer, P.: The Effect of Layer Thickness and Orientation of the Workpiece on the Micro- and Macrogeometric Properties and the Machining Time of the Part during 3D Printing, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 67(2), pp. 143–150, 2023. <https://doi.org/10.3311/PPme.21473>
- [4] Kónya, G., Ficzer, P.: A rétegvastagság és az alkatrész tájolásának hatásai az alkatrész mikro- és makrogeometriai jellemzőire 3D nyomtatás során GRADUS 9 : 2 Paper: 2022.2.ENG.005 , 11 p.(2022), <https://doi.org/10.47833/2022.2.ENG.005>
- [5] Alzyod H, Takacs J, Ficzer P.: Improving surface smoothness in FDM parts through ironing post-processing. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2023;0(0). doi:10.1177/07316844231173059
- [6] Ficzer, P.: A vasalási eljárás paraméter-változásának hatása a felületi érdességre FFF eljárással készített additív gyártás esetén, Országos Additív Ipari Tudományos Konferencia és Workshop, szakmai előadás, Neumann János Egyetem, Kecskemét, 2023. szeptember 15.

AUTÓIPARI NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOK ÉS ALUMÍNIUM ÖTVÖZETEK ELLENÁLLÁS-PONTHEGESZTÉSE ÉS VEGYES KÖTÉSE

RESISTANCE SPOT WELDING AND DISSIMILAR JOINING OF AUTOMOTIVE HIGH-STRENGTH STEELS AND ALUMINIUM ALLOYS

Sahm alden Abd al al*, Mariann Fodorné Cserépi**, Marcell Gáspár***, Ákos Meilinger****

ABSTRACT

Automotive industry developers strive to increase energy efficiency by reducing the weight of vehicles for economic, environmental and technical purposes. Resistance spot welding (RSW) is one of the most common welding methods for metal sheets in the automotive industry. Metal sheets with a high level of mechanical properties, such as advanced high-strength steels and aluminium alloys, increase the efficiency, durability and crashworthiness behaviour of the vehicle body. The dissimilarity between sheets creates a great challenge in terms of resistance spot welding (RSW) joints, especially in aluminium/steel. Two types of dissimilar RSW joining were analyzed, steel/steel (DP600/MS1400 and DP1000/MS1200) and aluminium-steel (DP800/5754-H22 and DP800/6082-T6). Welding parameter optimization technology was performed on 1 mm thick standardized sheets to create defect-free weld nuggets (WN) with acceptable tensile-shear and microhardness results. The intermetallic compound layer was investigated in the aluminium-steel spot joints as it has a significant impact on spot welding properties. A microstructure test was conducted to analyze the heat-affected zone (HAZ) that occurred in steel sheets and (IMC) layer in aluminium-steel joints of the weld nugget (WN). The failure mode was observed and analysed based on the microhardness and tensile shear test results.

1. INTRODUCTION

In the current conditions of industrial production, the production requires extensive and careful economic,

technical and environmental planning. The automotive industry is relatively huge and deserves a great effort in development, as the global automotive manufacturing market value was around 2.86 trillion U.S. dollars in 2021 [1]. Passenger car bodies are often formed of thin metal sheets according to the specific demands in the design, as its chosen based on the mechanical properties and weldability. In the automotive industry, various joining methods processes are used to join the vehicle body parts formed from thin metal sheets such as resistance spot welding (RSW), laser beam welding, adhesive bonding, clinching [2, 3], etc. RSW will remain dominant in the near future since this process has the most engineering and economic advantages. Most carmakers prefer RSW over other joining techniques, as has a significant impact on spot welding properties. A microstructure test was conducted to analyze the heat-affected zone (HAZ) that occurred in steel sheets and (IMC) layer in aluminium-steel joints of the weld nugget (WN). The failure mode was observed and analysed based on the microhardness and tensile shear test results. They have good experience with the process in terms of productivity and quality. In the last two decades, the use of Advanced High Strength Steels (AHSS) and high strength-to-weight ratio metals such as alloyed aluminium (Al) sheets increasing rapidly in the automotive industry to reduce vehicle weight to eliminate fuel consumption and to increase the ability of impact energy absorption. The design strategy of using multi-material lightweight (MML) in the vehicle's body in white (BIW) is to obtain the best performance with the lightest weight. Fig. 1 shows a schematic drawing for different types of metals including aluminium in the Audi TT body structure, as an example.

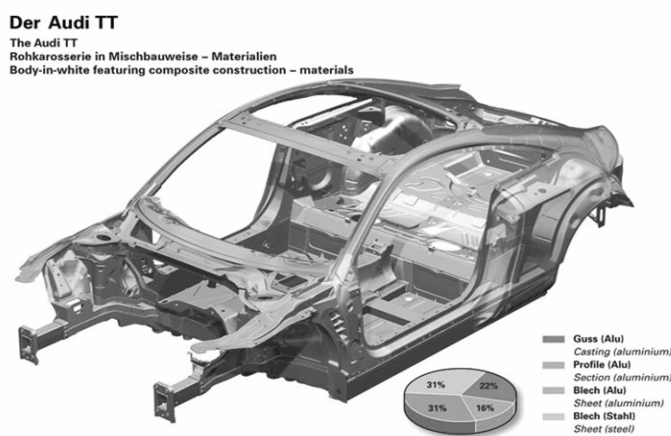


Figure 1. of Body in white (BIW) schematic of Audi TT [4]

* PhD student, University of Miskolc, Institute of Material Science and Technology

** Assistant lecturer, University of Miskolc, Institute of Material Science and Technology

*** Associate professor, University of Miskolc, Institute of Material Science and Technology

**** Associate professor, University of Miskolc, Institute of Material Science and Technology

In this paper two types of dissimilar joints were performed (steel/steel and aluminium/steel), and the results were compared with literature data. For dissimilar steel joints dual phase (DP) and martensitic (MS) steels were used. DP steel consists of a ferrite matrix including martensite islands, the ferrite specifies the property of ductility and the martensite specifies the strength. DP steels are vastly used by carmakers due to their desired mechanical properties in the automotive industry. In MS steels martensite makes up most of the formation compared to ferrite which forms the minority so it is characterized by high strength up to 1700 MPa with low elongation [3]. For the aluminium/steel joining due to low solubility between Fe and Al. An the intermetallic compound (IMC) formation is essential to create a metallurgical bonding interface joining between the steel and aluminium. The difference between the thermal properties of Al and steel can cause cracking problems after welding. As a result of the high diffusivity of Al in the Fe, the formation of Al-rich IMCs is higher than Fe-rich. Therefore, the thickness of IMC should be controlled to avoid brittleness problems as the IMCs generally characterised by very high hardness and low fracture toughness [5]. Fig. 2 shows Al-rich part of the Fe–Al phase diagram.

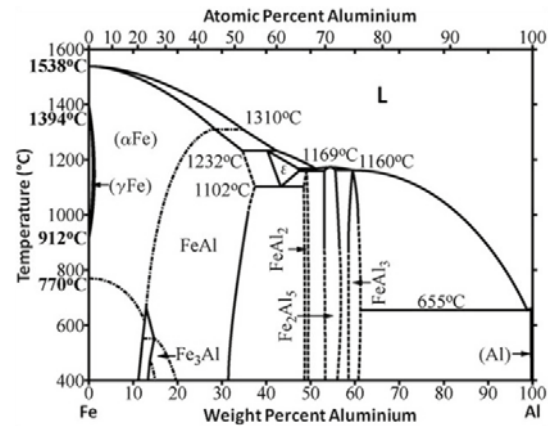


Figure 2. Fe–Al phase diagram [7]

2. MATERIALS AND METHOD

Two types of dissimilar joints were used for the RSW samples. Regarding steel/steel joints DP600/MS1400 and DP1000/MS1200 were carried out, concerning aluminium/steel DP800/5754-H22 and DP800/6082-T6 RSW joints were performed. The chemical composition and mechanical properties due to the base material certificate are shown in Table 1, 2, 3, and 4 respectively.

Table 1. Chemical composition of Al base metals in wt. %

Base metal	Cu	Fe	Mn	Cr	Mg	Ti	Si	Zn	Al
5754-H22	0.055	0.294	0.358	0.009	2.796	0.016	0.193	0.034	rest
6082-T6	0.09	0.46	0.46	0.02	0.7	0.03	0.9	0.08	rest

Table 2. Chemical composition of steel sheets in wt. %

Base metal	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	B	Fe
DP600	0.098	0.2	0.81	0.015	0.002	0.014	0.010	0.0002	rest
DP800	0.129	0.2	1.52	0.014	0.003	0.015	0.02	0.0003	rest
DP1000	0.132	0.19	1.50	0.010	0.003	0.014	0.010	0.0002	rest
MS1200	0.105	0.20	1.59	0.011	0.003	0.000	0.010	0.0022	rest
MS1400	0.220	0.46	2.46	0.016	0.003	0.000	0.023	0.0000	rest

Table 3. Mechanical properties of Al base metals

Base metal	R _m [MPa]	R _{p0.2} [MPa]	A ₅₀ [%]
5754-H22	220	137	22
6082-T6	348	303	15

Table 4. Mechanical properties of steel base metals

Base metal	R _m [MPa]	R _{p0.2} [MPa]	A ₈₀ [%]
DP 600	448	669	18.7
DP 800	585	871	15.5
DP 1000	821	1074	9.5
DP 1200	1108	1289	4.5
DP 1400	1391	1496	4.5

All samples were prepared from 1 mm sheet thickness and Fig. 3 shows the schematic drawing of RSW samples geometry for the tensile-shear (T-S) test.

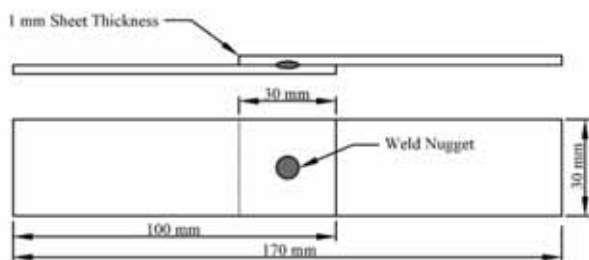


Figure 3. Schematic drawing for T-S test samples

All RSW experiments were performed by a TECNA 8007 spot welder machine controlled by TE550 microprocessor-based welding control unit. Based on the literature RSW was carried out by two pairs of welding electrodes. For steel/steel dissimilar joints copper chromium zirconium (CuCrZr) electrodes with a 5 mm tip diameter and 50 mm spherical tip radius and

aluminium/steel joints with 40 mm hemispherical tip diameter of copper aluminium oxide (Cu-Al₂O₃) were used. All samples were wiped and cleaned from dust, rust and grease to avoid any defects during welding. Due to statistical considerations eleven samples were welded for each welding parameter combination to be subjected to microhardness and T-S tests. Table 5 shows the welding parameter combinations from welding current (I), number of pulses (P), electrodes force (F) welding time (WT) and cooling time (CT). The stable current was conducted for all spot joints as the steel/steel welding parameters were nominated based on our previous experimental results to produce a defect-free RSW weld nugget. For the microhardness test the samples were cut and polished properly. As a prior step of etching by (Nital) at the rate of 2.5 vol.% HNO₃+ 97.5 vol.% ethanol. Vickers hardness (HV 0.2) was conducted by microhardness testing tool for DP600/MS1400 and DP1000/MS1200 dissimilar samples and for (DP800/5754-H22 and DP800/6082-T6) dissimilar joints Vicker hardness (HV0.1) were carried out.

Table 5. Welding parameter combinations

Base Metals of Dissimilar Joints	Current (I) kA	No. of Pulses (P)	Electrode Force (kN)	Welding Time (Cycle) (WT)	Cooling Time (Cycle) (CT)
DP600/MS1400	5.8	1	3	12	
DP600/MS1400	6.4	2	3	6×2	15
DP600/MS1400	8.5	1	4	16	
DP1000/MS1200	5.8	1	3	12	
DP1000/MS1200	6.4	2	3	6×2	15
DP1000/MS1200	8.5	1	4	16	
DP800/5754-H22	16.5	1	2.5	11	
DP800/6082-T6	15	1	2.5	11	
DP800/6082-T6	15	1	2.5	22	

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Tensile-shear (T-S) tests

In steel/steel dissimilar joints the samples were welded by 8.5 kA current and have shown the highest value of the T-S test where T-S value of the DP1000/MS1200 sample registered a noticeable value in the same welding parameter combination. The values of the T-S test were compared with the results of similar samples from the same base material as shown in Table 6 where the test results showed a remarkable convergence in terms of nugget diameter and T-S strength at the same welding parameters. The maximal force in in MS1400 similar

joints was higher compared to dissimilar joints, due to the higher amount of alloying elements, and so the higher percentage of martensite in the base material. It can be said that the highest value of current, force and welding time generates the largest weld nugget size as shown in Table 6. Larger nugget size directly influences the strength of the RSW joint as the stresses during the T-S test distributed on a larger area to withstand the failure [8]. Fig. 4 shows the stress distribution during the T-S test.

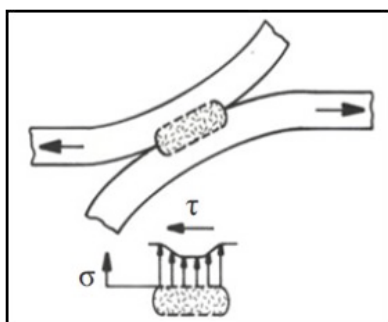


Figure 4. Schematic of T-S test stresses distribution applied on weld nugget

For the aluminium/steel dissimilar joints, the RSW joining technique is completely different from similar samples. The size and thickness of the formed IMC layer in between steel and aluminium define the metallurgical bonding properties [9, 10]. The T-S test results showed a noticeable convergence with RSW aluminium similar joints, as shown in Table 6. DP800/6082-T6 joint indicated the lowest T-S test result in longer welding time (22 cycles) and thicker IMC layers were formed so it was

excluded from the evaluation. The steel/aluminium dissimilar joints were compared with the aluminium/aluminium (similar and dissimilar) joints welded with optimised welding parameters that have shown satisfactory results in terms of the T-S test, and a great convergence was found especially in between DP800/6082-T6 and 6082-T6/6082-T6 samples, while DP800/5754-H22 joint has shown 12% lower than 5754-H22/5754-H22 joint (Table 6). Other joining techniques of aluminium/aluminium joints are also compared, Table 6 shows T-S test results of Adhesive Bonding (AB) and AB with RSW combination joining methods. It clearly shows the superiority of the last joining methods over RSW joining as the AB joints showed the highest strength against T-S stresses as a result of the large area of adhesion (30 × 30 mm); however, (AB+RSW) joints showed lower T-S strength compared with AB. The reason was given because the bonded area is less due to heat generated from the RSW welding in the vicinity of the spot weld, moreover, the behaviour of the joint during the T-S test led to reducing the T-S strength lower than AB bonding.

Table 6. Comparative tensile-shear results (F_{ts}) for 1 mm thick similar and dissimilar joints

Base Material	(I) kA	P	WT (C)	CT (C)	Joining Method	F_{ts} (kN)	Joining Tec.	Joining Size (mm)	Source
DP600/ MS1400	5.8	1	12	N/A	RSW	10.0	WN	4.83	Own
DP600/ MS1400	6.4	2	6×2	15	RSW	9.6	WN	4.69	Own
DP600/ MS1400	8.5	1	16	N/A	RSW	13.4	WN	6.87	Own
DP1000/ MS1200	5.8	1	12	N/A	RSW	10.7	WN	4.91	Own
DP1000/ MS1200	6.4	2	6×2	15	RSW	11.0	WN	4.71	Own
DP1000/ MS1200	8.5	1	16	N/A	RSW	17.2	WN	6.81	Own
DP800/ 5754-H22	16.5	1	11	N/A	RSW	2.4	IMC	9.0	Own
DP800/6082-T6	15	1	11	N/A	RSW	2.5	IMC	9.0	Own
DP800/ 6082-T6	15	1	22	N/A	RSW	2.2	IMC	9.2	Own
DP600	5.7	1	12	N/A	RSW	9.8	WN	5.0	[12]
DP1000	5.7	1	12	N/A	RSW	12.7	WN	5.0	[12]
MS1200	8.5	1	16	N/A	RSW	17.9	WN	6.7	Own
MS1400	8.5	1	16	N/A	RSW	17.6	WN	6.8	Own
5754-H22	-	1	-	N/A	RSW	2.1	WN	-	[11]
6082-T6	25.0	1	7	N/A	RSW	2.4	WN	-	[11]
5754-H22/ 6082-T6	-	1	-	N/A	RSW	2.3	WN	4.2	[11]
5754-H22	N/A	N/A	N/A	N/A	AB	5.3	Gluing	30×30	[11]
6082-T6	N/A	N/A	N/A	N/A	AB	7.65	Gluing	30×30	[11]
5754-H22/ 6082-T6	N/A	N/A	N/A	N/A	AB	5.2	Gluing	30×30	[11]
5754-H22	-	1		N/A	RSW+AB	4.7	WN+ Gluing	-	[11]
6082-T6	25.0	1	7	N/A	RSW+AB	6.5	WN+ Gluing	-	[11]
5754-H22/ 6082-T6	-	1		N/A	RSW+AB	4.7	WN+ Gluing	-	[11]

3.2. Microhardness test

In the dissimilar steel/steel RSW joint, a steep gradual increase in hardness was observed in the dual phase side (DP600, DP1000) in all welding parameters due to the presence of the martensite from MS1200 and MS1400 into the whole nugget. The peak hardness was observed in the fusion zone. Softening occurred in the HAZ in all samples except the DP600 side. In the double pulse parameter, two softening zones were observed on the MS1400 side. In DP1000/MS1200 samples the softening in MS1200 side higher than in DP1000 side, see Fig. 5 and Fig. 6.

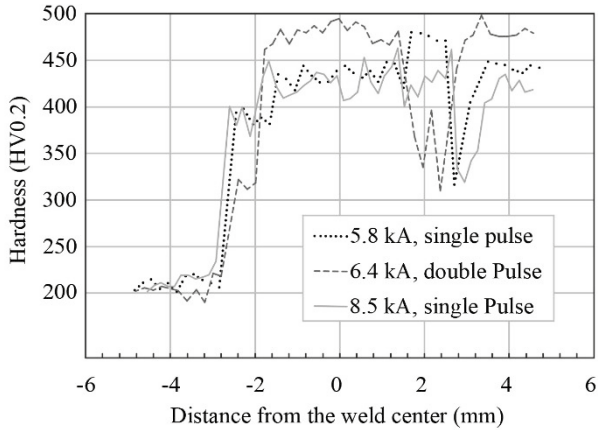


Figure 5. Vickers hardness (HV0.2) distribution profiles for DP600/MS1400 samples

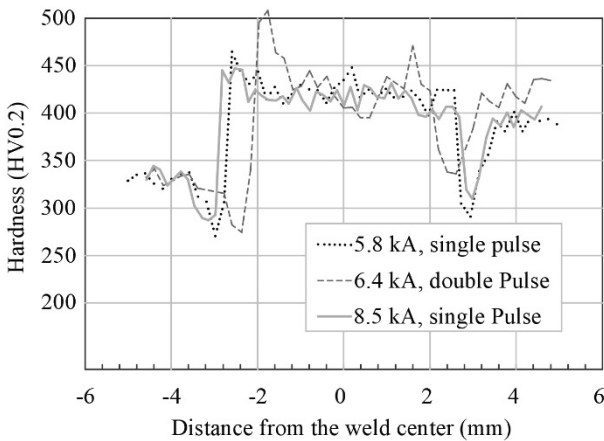


Figure 6. Vickers hardness (HV0.2) distribution profiles for DP1000/MS1200 samples

The previous hardness investigations were compared with steel/steel similar joints. Due to the base metal similarity the hardness distribution has shown a symmetric diagram in all samples. Softening zones were observed in the HAZ in all samples while the hardening was observed at the fusion zone. The biggest softening

occurred in the 8.5 kA welding current samples and four softening zones occurred in double pulse samples, see Fig. 7 and Fig. 8.

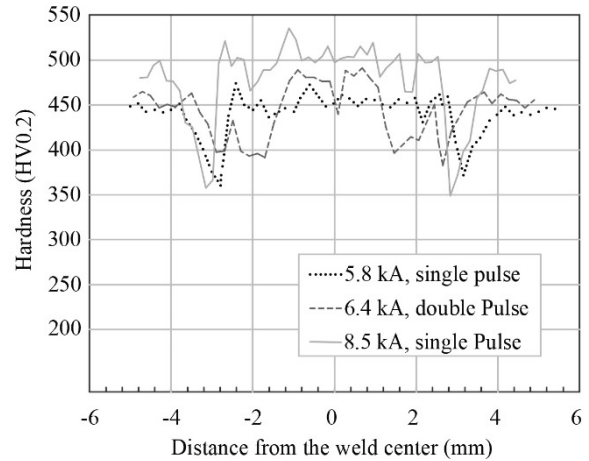


Figure 7. Vickers hardness (HV0.2) distribution profiles for MS1400/MS1400 samples

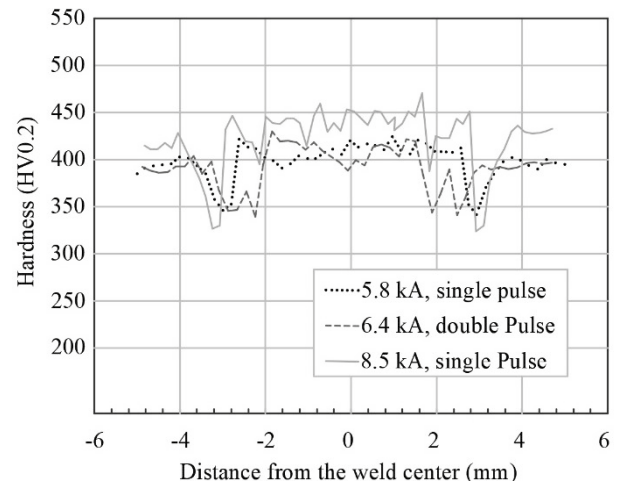


Figure 8. Vickers hardness (HV0.2) distribution profiles for MS1200/MS1200 samples

In aluminium/steel joints the hardness (HV0.1) was measured in the middle of the sheet thickness of aluminium (5754-H22,6082-T6) and DP800 steel. In the 6082-T6 side, the softening occurred in the HAZ, while the hardening happened for 5754-H22 unexpectedly. It may be due to several reasons, including insufficient heat input or aluminium forming. On the DP800 side, the hardness values increased significantly in the heat-affected zone, where similar 6082-T6 joints are compared and have shown almost identical hardness distribution to the same material that joined to DP800 in dissimilar joints see Fig. 9.

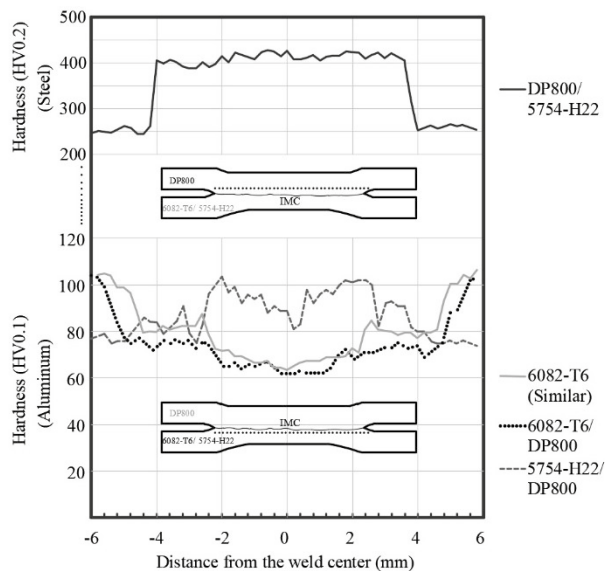


Figure 9. Vickers hardness distribution profiles Al/Steel dissimilar samples

4. Conclusion

In this research, resistance spot welded (RSW) joints were prepared on dissimilar steel/steel (DP600/MS1400, DP1000/MS1200) and aluminium/steel (DP800/5754-H22, DP800/6082-T6) joints. Different welding parameter combinations were investigated with tensile-shear (T-S) and microhardness tests. All evaluations were compared with optimized results from the literature.

Regarding steel/steel dissimilar joints the long-time welding with high welding current and welding force showed the best result in terms of T-S, thus the T-S test results are directly proportional to the diameter of the weld nugget. The high amount of martensite in MS1200 and MS1400 is the main reason for hardening in the weld nugget at DP600 and DP1000 sides. Noticeable convergence was observed between similar and dissimilar joining in terms of RSW T-S results. The hardness distribution can be compared with similar samples except for DP600/MS1400 joint due to the large difference between the base metal formations.

Regarding aluminium/steel dissimilar joints joining cannot be achieved without interface IMC formation between aluminium and steel. Intermetallic compound layer formation parameters are the key point in Al/steel joint characterisation. Considerable RSW joints (DP800/6082-T6, DP800/5754-H22) were produced compared with similar RSW joints of aluminium base metals (6082-T6, 5754-H22) welded with optimized welding parameters and showed satisfactory results in T-

S and microhardness tests. The mechanical properties can be significantly enhanced by adding adhesive bonding to the RSW joining method.

5. References

- [1] <https://www.statista.com/statistics/574151/global-automotive-industry-revenue/>
- [2] Kovács P. Z., Jónás Sz.: Examination of Three-Layered Clinch Joints, *Key Engineering Materials*, 952, 2023. pp. 61-67
- [3] Szabolcs, J., Kovács, P. Z.: Multilayered Aluminum Clinch Joints: An Experimental and Numerical Investigation of the Manufacturing Process, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, VAE4, 2022. pp. 558-567.
- [4] https://www.autozine.org/Archive/Audi/old/TT_Mk_2.html
- [5] Kekik, M. et al.: Microstructural Evaluation and Influence of Welding Parameters on Electrode Plunge Depth in Resistance Spot Welded Dissimilar DP800HF/1200M Steel Joints, *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 2021. p1
- [6] Pouranvari, M.: Critical assessment 27: dissimilar resistance spot welding of aluminium/steel: challenges and opportunities, *Materials science and technology*, 33.15 (2017): 1705-1712.
- [7] Alessio, G., Paolo, M., Fabio, D.: Review of Aluminum-To-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications, *Metals*, 2019, 9, 315, pp. 1 – 28.
- [8] Liu, L., et al.: Resistance spot welded AZ31 magnesium alloys, part II: effects of welding current on microstructure and mechanical properties, *Metallurgical and Materials Transactions A* 41 2010. 2642-2650.
- [9] Alessio G, Paolo M., Fabio D.: Review of Aluminum-To-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications, *Metals*, 2019, 9, 315, pp. 1 – 28.
- [10] Wan, ZX., Wang, HP., Chen, NN., Wang, M., Carlson, B.: Characterization of intermetallic compound at the interfaces of Al-steel resistance spot welds, *J Mater Process Technol* 2017; 242, pp. 12–23.
- [11] Dobosy, Á, Gáspár, M. et al.: Investigating the joining of aluminium alloys by RSW/AB experiments and physical simulation, *Low Cost Materials Processing Technologies for Mass Production of Lightweight Vehicles*, 2018
- [12] Balogh, A. et al.: Hegesztetőség és a hegesztett kötések tulajdonságai, *Kutatások járműipari acél és alumíniumötvözet anyagokon*, Mc., Hungary, 2015.

A DFX TECHNIKÁK LEGÚJABB IRÁNYELVEI

BRAND NEW DIRECTIONS OF DESIGN FOR X

Dr. Gotthard Viktor, PhD, egyetemi adjunktus, BME Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék

ABSTRACT

Designers of today must execute different types of generally complex tasks. Hence a new deal has been developed, which looks for design activities from aspects of specializations. This is design according to an aspect, so called DfX (Design for X). It has many branches that have now developed into a really serious area of investment.

During my article I will introduce the new and brand-new directions of DfX, such as DfM (Modularity), DfF (Flexibility), or DfAI (Artificial Intelligence).

1. BEVEZETÉS

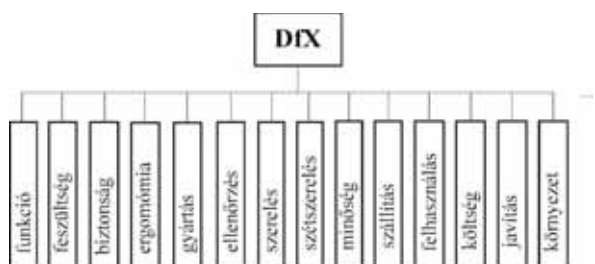
A DfX technikák elnevezés eredete az angol „Design for X” kifejezés és valamilyen szempontból helyes vagy optimális tervezést jelent [1]. Természetesen ez nem a többi szempont elhanyagolását, inkább a kiemelt szempont fókuszba helyezését, az annak inkább megfelelő tervezést jelenti.

A cikk az újabb és akár még alig elterjedt legújabb DfX irányokat és módszereket mutatja be. Ezek a moduláris elvű tervezés (DfM), a rugalmas tervezés (DfF) és az MI-t (mesterséges intelligenciát) alkalmazni tudó tervezés (DfAI).

2. A DFX TECHNIKÁK ISMERTEBB IRÁNYELVEI

A DfX technikákat igen széleskörűen alkalmazzák napjainkban a terméktervezés és a géptervezés során [2]. Mindjárt az elején pontosítanom, hogy a fejlesztés alapvetően kétféle folyamatot takar. Az egyik lehetőség egy teljesen új termék vagy gép kifejlesztése, a másik pedig egy meglévő optimalizálása, azaz továbbfejlesztése – bizonyos elvek mentén. Mindkettő esetén érdemben segítségünkre tud lenni a DfX technikák alkalmazása.

A DfX technikák módszertana mára komoly szakirodalommal bír és igen széleskörű gyakorlati ipari alkalmazás és sikertörténet során igazolta már a működését és a létjogosultságát. Napjainkra ezeket a szempontokat már DfX célszoftverek segítik a gyakorlatban is igen hatékonyan alkalmazni, óriási tapasztalat-alapú adatbázisba rendezett statisztikailag elemzett és feldolgozott adatok, értékek és körülmények alapján. A DfX technikák ismertebb és elterjedtebb módszerei az 1. ábrán láthatóak.



1. ábra. A DfX technikák elterjedtebb módszerei

Mivel ezek az ágak és irányok mára eléggé ismertté váltak, a továbbiakban az újkeletűbb és akár még csak bontakozó irányokat szeretném bemutatni.

3. DFM – DESIGN FOR MODULARITY

A moduláris elvű tervezés (DfM) a DfX technikák elvének és a moduláris rendszerek sajátosságainak keresztezésével jön létre. Azaz ebben egyesítésre kerülnek a fókuszált tervezés, valamint a moduláris elemekből álló termék- és gépcsaládok fejlesztési elvei.

A DfM egyesíti a géptervezés és a termékfejlesztés módszertanát is – a moduláris elvű tervezés szempontjából a legoptimálisabb módon. Moduláris elvű tervezés esetén az 1. táblázatban látható modul típusokra kell tudni felosztani a rendszer elemeit, ezekből lehet utána építkezni.

1. táblázat. Modul típusok és jellemzőik

MODUL TÍPUS	FUNKCIÓ, JELLEMZŐ
Alapmodul	Nem változik, mindig szükséges
Segédmodul	Csatoló, illesztő és határoló egységek
Speciális modul	Feladatfüggő, speciális kiegészítők
Illesztő modul	Más rendszerhez integráláshoz szükséges
Egyedi elem	Egyedi igények esetén

A moduláris elemekből álló elemkészlet moduljai adott határokon belül tetszőlegesen változtathatóak, azaz variálható az elemek lehetséges kombinációja. Az ilyen elemekből felépített berendezés összeszerelése vagy beüzemelése során flexibilisen változtathatóak a moduloktól függő egyes paraméter-értékek (pl. pozíciószám, lökethossz), akár az állítható egységek segítségével, akár a modulok gyors és egyszerű cseréje révén.

Amikor egy gyártósor már üzemel, manapság gyakran előforduló igény a típusváltás, amely (szemben a korábbi hagyományos megoldásokkal) szintén rugalmasan megoldható az elemkészlet segítségével (rövidtávú változtatás).

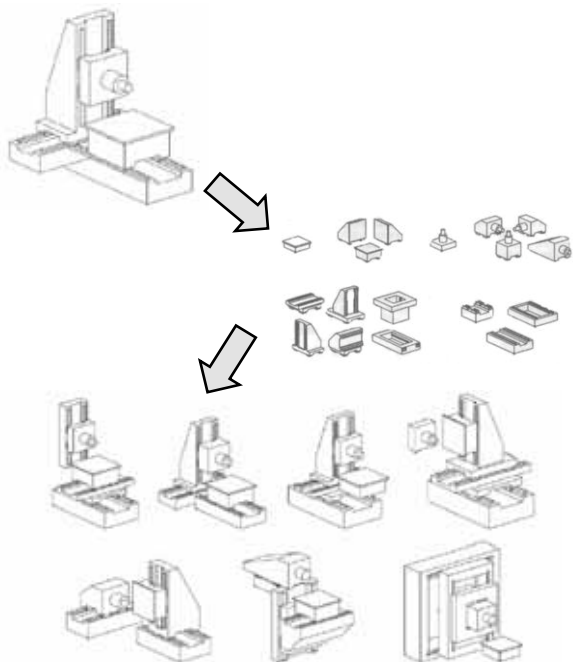
Az egész moduláris elemkészletet, valamint azok paraméter-értékeit elektronikus adatbázisban tárolják, és egy segédprogram kezeli, mindezek szintén rugalmasan változtathatóak a változó piaci igényeknek megfelelően (hosszútávú változtatás).

A rendszer rugalmassága még a berendezés szétszerelése után is érezhető, az egyes modulok ismételt felhasználása révén, biztosítva ezzel egy igen magas fokú újrahasznosítási arányt.

2. táblázat. Moduláris alapelvek és jellemzőik.

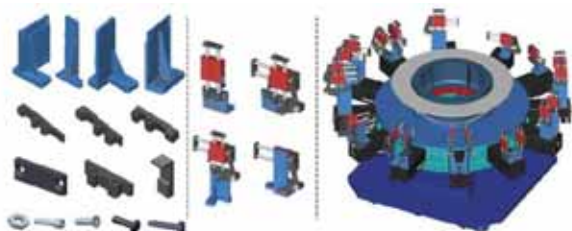
ALAPELV	JELLEMZŐK
MODULÁRIS ELEMEL	Alapelemek, modulok, illesztő modulok, egyedi tételek – ezek megfelelő kialakítása és kombinálási lehetősége.
RUGALMAS RENDSZER	A rendszer és az elemei legyenek alkalmasak a szabadon konfigurálásra mind az inicializáláskor, mind a továbbiakban.
SZABVÁNYOS ELEMEL	Olyan szabványos elemek választása vagy a modulok szabványosítása, amelyek gyorsan és könnyen cserélhetőek.
TECHNOLÓGIAI ILLESZTHETŐSÉG	Az egyes elemek, modulok kialakítása és működési elve egymáshoz illeszthető kell legyen.
STANDARD CSATLAKOZÁSOK	Az egyes moduláris elemek megfelelő csatlakozásának kialakítása: mechanikus és jelátvitel szempontjából.

A 2. táblázatban bemutatott elvek szerint szükséges felépíteni a moduláris rendszer elemkönyvtár-rendszerét (EKR), amely elemeinek felhasználásával az adott típusú termék, célgép vagy gyártósor az igény szerinti változatban és jellemzőkkel konfigurálható [4]. Egy jó példa látható a 3. ábrán [3] a moduláris elvű tervezéssel kapott szerszámgépegységek és -rendszerek bemutatására (alapgép → moduláris elemtípusok → kombinációk).



3. ábra. Moduláris szerszámgép alapgép, szerszámgép-elemek és néhány kombináció kialakítása

A következő ábrán egy a felsorolt elveknek megfelelő moduláris felépítésű célgép alapelemei, konfigurált egységei és egy lehetségesen kialakított célgép láthatók [4].



4. ábra. Moduláris felépítésű célgép elemei és alkalmazásuk

Az ábrán jól megfigyelhetők az alapelemek (bal oldalon), az ezekből létrehozható átrakó egységek (középen) végül pedig ezek egyféle kombinációjával létrehozott moduláris felépítésű indexelő asztalos célgép (jobb oldalon).

4. DFF – DESIGN FOR FLEXIBILITY

A flexibilis vagy rugalmas elvű tervezés lényege, hogy olyan elemekből építkezünk, amelyek állíthatóak, azaz bizonyos határok között igazíthatóak. Ezek többféle kombinációjával igen rugalmas rendszerű megoldásokat lehet kialakítani.

Az 5. ábrán jól megfigyelhető az egyes példáknál és megoldásoknál a flexibilis és a nem flexibilis kialakítás közötti eltérés. Az ábrából is látható, hogy a rugalmasság eredhet állíthatóságból, átconfigurálhatóságból vagy a szabványos kialakításból álló cserélhetőségből.

Termék	Flexibilis jellemző	Nem flexibilis megoldás	Flexibilis megoldás
építőköckő	variálhatóság		
kerékpárnyereg	magasságállítás		
kötőelem	szabványosan cserélhetőség		
vezérlőszekrény	kezelőfelület		
forgácsoló szereszmű	funkció		
villáskulcs	méret		
rögzítő-furat	pozíció		

5. ábra. Példák rugalmas és nem rugalmas kialakításra

Ilyen jellemzőket szükséges figyelembe venni és kialakítani egy új, rugalmas rendszer, gép- vagy termékcsalád kialakítása során.

A rugalmasság tovább is fokozható, ez jól látható a 6. ábrán, ahol a manuálisan állítható „rugalmas” villáskulcsból egy még rugalmasabb, önbeálló szerszámot alakítottak ki.



6. ábra. Rugalmas és beálló rugalmas szerszám-megoldás

A rendszer rugalmassága több jellemzőből is fakadhat. Az egyik az egyes elemek rugalmassága, állíthatósága, átalakíthatósága és akár az alváltozatai. A másik az egyes elemek rugalmas kombinációiból képezhető konfigurációk kialakítása. A harmadik pedig e kettő kombinációja is lehet.

5. A DFM ÉS A DFX ELVEK KOMBINÁLÁSA

A DFM és a DFF elvek ötvözésével létrehozható egy olyan moduláris elemekből álló EKR, amelynek az elemei rugalmasak, széleskörűen kombinálhatóak, kezdetben az adott igények szerinti konfigurációban egymáshoz integrálhatóak. A későbbiekben pedig az EKR új modulokkal is kiegészíthető, az építőszekrény-elv szerint [5], amelynek elemei és alkalmazásuk a 7. ábrán látható.

rendszer	építőegység	építőelemek	szimbólum	kombináció	példa
tisztá	kicsi	csak egyforma	□ □ □	□ □ □ □ □	tégla
		csak különböző	△ ○ □	△ ○ □ ○ □	mérőhasáb-készlet
		egyforma és különböző	□ □ □	□ □ □ □ □	irodabátort-család
	nagy	szerelvény	⊗	⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗	hajtómű
vegyes	különleges	tartozék	⊕	⊕ ⊕ ⊕ ⊕ ⊕	fényképező-gép
		csatlakozó	⊖	⊖ ⊖ ⊖ ⊖ ⊖	öntöző-rendszer
		szerelvény	⊗	⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗	benzin-motor

7. ábra. Moduláris elemek, típusaik és kombinálhatóságuk

Az ilyen moduláris rendszerek a jövőben az új igények szerint szétszedhetőek és újra-konfigurálhatóak, a szükségtelessé vált modulok elhagyásával és az aktuálisan szükségessé váltak beemelésével.

Ennek az elvnek az alkalmazására jó példa a 8. ábrán látható moduláris és rugalmas kialakítású irodabútor-elemek és néhány lehetséges konfigurációjuk [6].



8. ábra. Rugalmas kialakítású irodabútor elemek és négy lehetséges elrendezésük

Az ábrán jól megfigyelhető az egyes elemek egyszerűsége, ugyanakkor igen széleskörű kombinálhatósága és az ebből adódó magas fokú rugalmasság. Az egyes elemek modulárisan összeépíthetőek és újra átalakíthatóak, mindig az aktuális igény szerint. Ugyanakkor teljesen rugalmas az egymáshoz képesti elhelyezésük: a távolságuk és a bezárt szögük.

6. DFAI – DESIGN FOR AI

A folyamatosan fejlődő technikának köszönhetően egyre elterjedtebb lett a mesterséges intelligencia (magyarul MI, angolul: AI – Artificial Intelligence). Szinte bárki hozzáférhet és használhatja.

A mesterséges intelligencia használatának előnyei és hátrányai is vannak. Előnyei közé tartozik, hogy felgyorsítja a tervezés folyamatát, hiszen generál „saját” ötleteket, segít a legjobb termék kiválasztásában, hatalmas adatbázist tud pillanatok alatt feldolgozni és elemezni és mindez hozzájárul ahhoz, hogy még hatékonyabb termék születhessen meg a tervezés végén.

De hogyan lehet az MI szempontjából helyesen tervezni? Azaz hogyan lehet úgy kialakítani egy tervezési folyamatot, hogy érdemben és hatékonyan segítségül tudjuk hívni az MI már most nyújtotta lehetőségeket és előnyöket?

Miben és hogyan tud a segítségünkre lenni az MI és mi, tervezők hogyan tudjuk úgy definiálni a tervezendő terméket vagy berendezést, hogy az MI segíteni tudja a munkánkat a folyamat során [7]? Elsőként tekintsük át, hogy melyik tervezési lépésben melyik már most elérhető MI eszköz vagy platform tud a segítségünkre lenni.

3. táblázat. Tervezési fázisok és a támogató MI lehetőségek

TERVEZÉSI FÁZIS	TÁMOGATÓ MI ESZKÖZ	MIBEN TUD SEGÍTENI?
Adatgyűjtés	ChatGPT	Irodalomkeresés, konkurenciaelemzés, piackutatás
Ötletelés	Lexica	Termékötletkeresés, generatív tervezés, kreatív dizájn
Tervezés	Toggle3D.ai	3D modellre textúra elhelyezése, háttér, renderelés, fotó-realisztikus kép
Szimuláció, tesztelés	AnyLogic	Szimuláció futtatása, a termék virtuális környezetben való tesztelése
Dizájn optimalás	Toggle3D.ai	Terv finomhangolás, egyedi dizájn, ergonomikus kialakítás, optimalizálás

Mára már egyértelművé vált, hogy az MI milyen óriási segítséget tud nyújtani: rengeteg időt lehet megtakarítani, kreatív ötleteket tud felsorakoztatni és számos optimalizációt képes elvégezni, mindezt villámgyorsan.

Ahhoz azonban, hogy ezeket az MI alapú eszközöket segítségül tudjuk hívni a terméktervezés és a géptervezés során, meg kell tanuljuk, meg kell értsük a működésüket és jól kell tudnunk használni azokat. Mit sem ér egy igen hatékony szerszám, ha nem értő szakember kezébe kerül! Fontos tehát, hogy az MI nyújtotta lehetőségeket arra és úgy használjuk amire valók, így ténylegesen komoly segítséget nyújthatnak a tervezési folyamat során.

A következőkben bemutatott példa egy aktuális termékfejlesztési feladat, amelynek során a cél egy olyan függesztett lámpa megtervezése, amelyet egy nagyméretű 3D nyomtatón (munkatere: 5m x 1m x 1m) lehet és indokolt legyártani. A nyomtató fejlesztése egy szintén valós és aktuális fejlesztési feladat, a lámpa nagyobb terekben: szálloda hallban, recepció fölött vagy akár tárgyalóasztal fölött lenne elhelyezve.

A kiinduló termékötlet: egyedi és formagazdag kialakítás, világítási fő funkció, de emellett élő növényzet is lenne a lámpán – ezzel teremtve élő és érdekes kapcsolatot a dizájn (a 3D nyomtatásnak köszönhető szabad alak), a technika (világítás) és a természet (növényzet) között.

Fontos tehát, hogy a tervezési folyamatot úgy alakítsuk ki, hogy alkalmas legyen a lehetséges fázisai során az MI jelenleg elérhető alkalmazásainak használatára. A 4. táblázat az ennek megfelelő folyamatot mutatja be.

4. táblázat. Tervezési folyamat az MI támogatásával

FOLYAMAT LÉPÉS	KI VÉGZI?	RÉSZLETEK ÉS EREDMÉNY
Specifikálás	tervező	Feladat megfogalmazása, követelmények és súlyozás
Kulcsszavak	tervező	Feladatot pontosan leíró elvárt vagy kizárt kulcsszavak megfogalmazása
Termékötletek generálása #1	MI	Számos termék-kialakítás, sok eltérő és hasonló dizájn bemutatása
Szűrés	tervező	Kategorizálás: nem felel meg / megfelel, de nem tetszik / megfelel és tetszik
Szűkítés	tervező vagy megbízó	A „megfelel és tetszik” kategóriába eső ötletek szubjektív szűkítése
Termékötletek generálása #2	MI	A kiválasztott és szűkített ötletek alapján továbbiak generálása
Elemzés	tervező	Első áttekintés, ötletek véleményezése, objektív kontroll
Döntés	megbízó	A legoptimálisabb vagy a legjobban tetsző termék-változat kiválasztása

A táblázat egy optimális, kétkörös tervezési folyamatot mutat be, de természetesen amennyiben a második kör nem hoz az elvárásoknak megfelelő, azaz a megbízónak tetsző eredményt, az iteráció tovább folytatható. A folyamat során mindvégig nagyon fontos szerepe van mind a tervezőnek, mind az MI-nek, mind a megbízónak – azaz mindhármuk hozzáadott értéke és az együttműködésük is szükséges az optimális megoldásig történő eljutáshoz.

A következőkben egy ilyen folyamat lépései során kapott részeredmények egy részét mutatom be. A kiindulás tehát egy olyan dizájn lámpa megtervezésének MI által támogatott folyamata volt, amely nagyméretű, függesztett és élő növényt is tartalmaz. Az első MI általi generálás eredményeinek egy része látható a következő ábrákon. A 8. ábrán jól látható, hogy ugyan az elvárt jegyek megtalálhatóak az ábrákon, de egyik sem teljesíti egyben az összes elvárást.



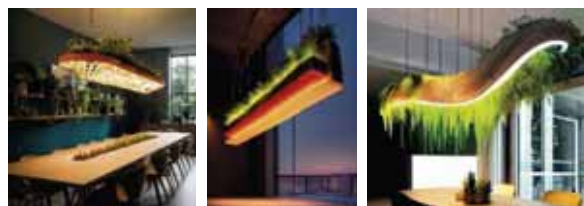
8. ábra. Az elvárásoknak nem megfelelő ötletek



9. ábra. Az elvárásoknak megfelelő, de az elképzelésekkel nem találkozó ötletek

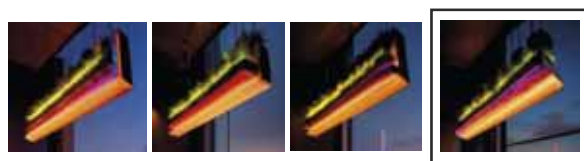
Jól látható, hogy a 9. ábrán látható termékötletek már teljesítik az összes elvárást, ám valamiért mégsem jutnak tovább, „nem ilyet keresünk”, azaz nem tetszenek vagy a tervezőnek vagy a megbízónak vagy egyiküknek sem.

A következő ábrán már az elvárásoknak megfelelő és az elképzelésekkel is találkozó megoldásokat láthatunk.



10. ábra. Az elvárásoknak megfelelő és tetszetős ötletek

Ezután következhetett tehát az egyik dizájn kiválasztása, ez történetesen a középső ötlet volt, azaz ennek a továbbgondolását adtuk az MI-nek feladatul.



11. ábra. A kiválasztott ötlet további alváltozatai és a végső megoldás

A 11. ábrán az ezután kapott ötletek születtek, amelyek között már ott lapul a végső, kiválasztott megoldás.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk során igyekeztem bemutatni a legújabb DfX technikák irányelveket és tervezési módszereket. Jól látható, hogy a technikai fejlődéssel és a tudomány haladásával sorra alakulnak ki az új DfX irányok és épülnek be a tervezélmélet és -módszertan eszközei és folyamatai közé.

És még szót sem ejtettünk az újrahasznosítás (DfR-Recycling), innováció (DfI-Innovation), robotizált szerelés (DfRA-Robotic Assembly) vagy akár az alacsony fogyasztás (DfLP-Low Power) szempontú tervezési irányokról és módszerekről, pedig mára már ezek is léteznek!

8. IRODALOM

- [1] Andreassen M. M.: Multi product development: New models and concepts, 15. Symposium “Design for X” Neukirchen, October 14-15, 2004.
- [2] Bercsey T.: A termékfejlesztés és tervezés innovatív módszere. Géptervezők és Termékfejlesztők XX. Országos Szeminárium, Miskolc, 2004.
- [3] Németh I.: 3-tengelyes szerszámgépek felépítési változatainak tervezése, BME Gépgyártástechnológia Tanszékének oktatási segédlete, Budapest, 2004.
- [4] Dr. Gotthard V.: Moduláris felépítésű gyártósorok tervezésének elmélete és gyakorlata, PhD értekezés, BME, 2008.
- [5] Kripác F.: Az “építőszekrény”-rendszer alkalmazása a technikában, KGM-MTPI, Budapest, 1963.
- [6] How is flexible office design improving business resilience? - <https://www.mmoser.com/ideas/flexible-office-design> (2023.10.15.)
- [7] The Benefits of Using AI for Product Design (With Examples) - <https://www.nextechar.com/blog/benefits-of-using-ai-for-product-design> (2023.09.10.)
- [8] ChatGPT - <https://openai.com/blog/chatgpt> (2023.09.17.)
- [9] Lexica - <https://lexica.art/> (2023.09.12.)
- [10] Toggle3D.ai - <https://toggle3d.com/> (2023.09.12.)
- [11] AnyLogic - <https://simul.ai/project/anylogic-simulation-software> (2023.09.13.)

FORGÁCSOLÁS NAGYKINYÚLÁSÚ SZERSZÁMOKKAL

MACHINING WITH LONG EXTENDED TOOLS

Hegedűs György, PhD, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet

ABSTRACT

This article presents the vibrations that can be generated during machining and the sources responsible for these vibrations. Special attention must be paid to the damping of vibrations because of the surface quality requirements, otherwise damaging vibrations will adversely affect the quality of the manufactured part. The examples presented illustrate that vibration requirements are greatly reduced in long tooling, for which there are both manufacturing and design solutions.

1. BEVEZETÉS

Megmunkálás közben megfigyelhető a forgácsoló rendszer lengése, ezt forgácsolási rezgésnek nevezzük. A forgácsolási folyamatban bizonyos feltételek mellett a rezgések fokozódnak, melynek hatására a rendszer elveszíti a stabilitását. Ezért a megmunkáló rendszerben fellépő rezgéseket károsnak kell tekintenünk. Egy rendszer lengő mozgását belső gerjesztő erők okozzák. Ezek lehetnek elsődleges és másodlagos gerjesztők. Elsődleges gerjesztők azok az erők, amelyek a lengést közvetlenül kiváltják, másodlagos gerjesztők az elsődleges gerjesztők hatására jönnek létre. Forgácsolás során elsődleges gerjesztések lehetnek például a környezetből átvett rezgések, a megmunkált anyag inhomogenitásából vagy alakjából, a forgács leválásából származó rezgések. Az elsődleges gerjesztők miatt kialakult rezgéseket a szerszám rámásolja a megmunkált felületre, amely a felületi minőségre van hatással (érdesség, hullámosság). Ezt a felületet tovább munkálva a hullámok újabb első gerjesztőként lépnek fel a már korábban meglévők mellé, azok hatásait tovább erősítve. Ilyen vonatkozásban az elsődleges gerjesztők hatásai lesznek a másodlagos gerjesztők. A megmunkáló rendszer tagjainak merevsége hatással van az elsődleges gerjesztők hatásaira. Ha a tagok merevek, a kitérések kicsik, akkor az elsődleges

gerjesztőerők is csökkennek állandó frekvencián, ezzel ki lehet küszöbölni a nagyobb elsődleges gerjesztő erőket, amelyek az öngerjesztést okozzák. Ha az öngerjesztést a másodlagos gerjesztőerők okozzák, akkor valamelyik rendszertag merevségének csökkentésével lehet elkerülni annak kialakulását [1].

2. REZGÉSCSÖKKENTÉS LEHETŐSÉGEI

Megmunkálás során rezgések léphetnek fel a szerszám, a befogó, a munkadarab vagy a szerszámgép korlátai miatt. Ez a jelenség minden esetben fennáll, amelyet elfogadunk bizonyos mértékig. Azonban előfordulnak olyan forgácsolási feladatok is, amikor annak teljesítéséhez át kell lépni egy vagy akár több korlátot is. A szerszámgép és szerszámgyártók fejlesztésekkel keresik azokat a megoldásokat, amelyekkel ezek a határok kitolhatóak, ezzel szélesebb teret adva a felhasználók számára a feladatok elvégzéséhez. Ehhez a gépágyak, szánrendszerek, illetve a szerszámok tervezése számítógépes analízissel készülnek, amelyekkel több információ nyerhető már a tervezés során a valós működés közbeni hatásokról.

2.1 Forgácsoló szerszám geometria

A marószerszámok geometriája különböző lehet, így az arra ható forgácsoló erők iránya is ettől a geometriától függ. A gyakorlatban a következő alakok terjedtek el:

- 90° -os: a radiális irány a meghatározó iránya a forgácsoló erőknek. Ez elhajlást okoz hosszú kinyúlásnál, viszont kedvezően hat a rezgésre hajlamos vékonyfalú alkatrészek megmunkálásánál, mivel a tengely irányú komponens kisebb.
- 45° -os itt a radiális és axiális irányokban egyenletesen oszlanak el az erők.
- *Körlapka*: ebben az esetben a forgácsoló erők nagy része az orsó felé irányul, ezért hosszú szerszámoknál ez a legkedvezőbb

alak. A szerszámválasztásnál mindig törekedni kell a legkisebb szerszám átmérő használatára, amellyel még az adott feladat elvégezhető.

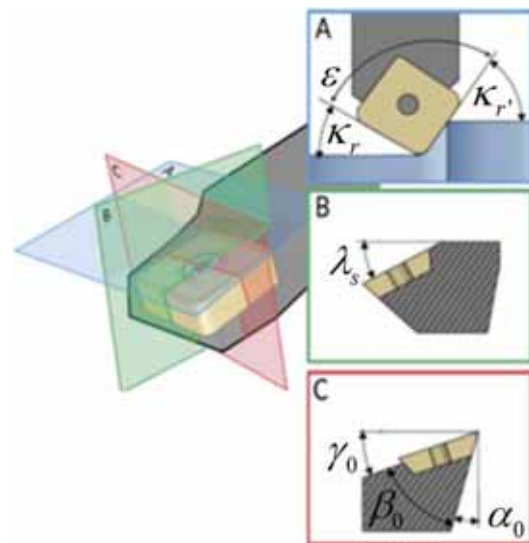
Szerszámátmérő: legfeljebb 50-70%-a legyen fogásban. Fontos szerepe van a marószerszám fogásba gördülésének. Úgy érhetjük el a vékonyabb forgács keletkezését, ha a marót a fogás középvonalán kívülre pozicionáljuk. Így kevésbé hajlamos a szerszám a rezgésre. Fogak száma: ritka fogú, vagy differenciált fogosztású szerszám használata javasolt. A kis tömegű marószerszámok használatával még inkább elkerülhetjük a rezgések kialakulását. A forgácsolási stratégiánál figyelembe kell venni a megmunkált alkatrész jellegét, stabilitását megmunkálás közben. A szerszám belépési szöge is hatással van a rezgésekre. Vékony falvastagságú, illetve kevésbé stabil alkatrészek munkálásánál inkább rövid szerszámot célszerű választani és nagy belépési szöget. Ez kis axiális forgácsoló erőt fog jelenteni. Ha nagy kinyúlást kell alkalmazni, akkor viszont a kis belépési szöggel járó nagy axiális erő a kedvezőbb. Ez utóbbi esetben az erők nagy részét az orsó fogja felvenni így a szerszám kevésbé lesz kihajlásra hajlamos [3].

2.2 Forgácsoló szerszámok élgeometriája

A forgácsoló szerszámok élgeometriája igen változatos, mivel különböző célra készülnek, ezért értelmezésüket a legegyszerűbb egyélű szerszámon elvégezni. A forgácsoló szerszámok két fő részből állnak. A szárból és a forgácsoló részből. A forgácsoló rész élgeometriája alatt értjük a rajta lévő felületek, szögek és vonalak összességét, ezek számszerű értékeit és egymáshoz viszonyított helyzetét. A szerszámlapok és szerszámélek által bezárt szögeket élszögeknek nevezzük. Ezeket ortogonál és normál koordináta rendszerben értelmezhetjük. A normál koordináta rendszerben értelmezhető szögek és jelölésük a következő:

- a szerszám élsík és az előtolóirány által bezárt szög a szerszámelhelyezési szög (κ_r),
- a szerszám melléksík és a szerszám élsík által bezárt szög a szerszámcsúcshög (ε_r),
- a szerszám melléksík és az előtolóirány által bezárt szög a szerszám

mellékforgácsoló élének elhelyezési szöge (κ_r) [2].



1. ábra. A forgácsoló lapka szögei a normál koordinátarendszerben [2].

Az ortogonál síkban értelmezett szögek:

- szerszám ortogonál hátszög (α_0),
- szerszám ortogonál ékszög (β_0),
- szerszám ortogonál homlokszög (γ_0),
- az élsíkban értelmezhető a szerszám terelőszög (λ_s).

Az egyes szögértékeket a munkadarab és a szerszám anyagától függően táblázatok segítségével lehet megállapítani. A homlokszögek értékei lehetnek pozitív, negatív, vagy nulla. A rezgések csökkentését segíthetjük a helyes élgeometria megválasztással is. Az éles szerszámok vékony bevonattal és negatív forgácsolóélgeometriával lágyan forgácsolnak. Bizonyos esetekben az enyhén kopott élű szerszám mutatkozik jobb megoldásnak. Az ilyen típusú megmunkálásoknál fontos a tapasztalat és az intuíció is [3].

2.3 Szerszámtartó

Nagy mélységű megmunkálásoknál túlméretes marókat használunk. Ezek általában kettő vagy több szerelhető egységből épülnek fel. A jól megtervezett szerszám befogó készülékek és gyorscsatlakozó modulelemek csökkentik a szerszámozásból eredő mellékidőt, ami a termelékenységet növeli. Közvetlenül a főorsóba csatlakozó befogója miatt a szerszámok több gépen is használhatóak.



2. ábra. Moduláris szerszámcsatlakozások esztergálási műveletekhez [4].

A szerszámot a moduláris gyorscsatlakozó segítségével lehet cserélni (2. ábra), amely segítségével még gyorsabbá válik a szerszámcsere. A megmunkálóközpontokon jól használható rendszer sokféle adaptert, hosszabbítót, szűkítőt tartalmaz, ezáltal lehetővé téve különböző alakú és hosszúságú szerszámok összeszerelését. Nagy előnye, hogy kevesebb speciális és drága szerszám is elegendő lehet. Több gépen is használható megfelelő gyártásütemezéssel. A moduláris szerszám használatánál szem előtt kell tartani néhány szabályt a hatékony megmunkálás érdekében. Szerszámselectvény választásánál a lehető legmerekvebb szerszámtest elérése a cél, ezért a legnagyobb átmérőt és a legrövidebb hosszt kell használni. Szűkítők helyett kúpos toldókkal kell kisebb átmérőre szűkíteni a szárat. Törekedni kell a lehető legkevesebb elem használatára. Ha lehetőség van rá, akkor több lépcsőben végezzük el a marást. A tapasztalat szerint a rövidebb szerszámtest használata kedvezőbb. Meg kell határozni marási szinteket és a hozzájuk tartozó technológiát, amivel hatékonyabbá tehető a megmunkálás. A szerszám rezgésre való hajlama megnő amennyiben az eléri a kritikus L/d viszonyt. Ennek a hatásnak a kiküszöbölésére fejlesztették ki a rezgéscsillapított szárat (3. ábra). Rezgéscsökkentő módszerek marás közben szármáró esetén a radiális bemerülés ne legyen nagyobb, mint a szerszámátmérő 25%-a, az axiális lehet nagyobb.



3. ábra. Moduláris szerszámcsatlakozások esztergálási műveletekhez [4].

Homlokmaró esetén kis axiális fogással, nagy fogankénti előtolással célszerű a marást végezni. A pályarádiuszokat lágyítani kell, ezzel is csökkentve a sarkokban kialakuló rezgéseket. Kis forgácskeresztmetszetenél a szerszám inkább dörzsöl, mint forgácsol, ezzel rezgéseket kelt, ekkor célszerű a fogankénti előtolás növelése [3].

2.4 A szerszám gép

Forgácsolás során fellépő erőket a szerszám és a megfogó készülék továbbítja a szerszám gép mozgó szerkezeti egységeire és a hajtásrendszerre. Ezek átadják a gépvázra, amely a talajba juttatva vezeti le azokat. A mozgó és álló szerkezeti egységek között lineáris csapágyak biztosítják a kapcsolatot. Ezek kialakítása meghatározó a szerszám gép pontosságára, merevségére és gyorsaságára nézve. Rezgések kialakulásának szempontjából fontos tulajdonság a szerszám gép merevsége. Ezt meghatározza egyrészt a vázszerkezet anyaga és alakja, másrészt az egymáson elmozduló szerkezetek közötti lineáris csapágyak vagy másnéven csúszóvezetékek kialakítása. Az egymáson elcsúszó felületeket kezdetben kimunkálták a szükséges helyeken, később a megnövekedett pontosság igénye miatt a felületi érdességen javították, így növelve a szerszám gép pontosságát. Az érdesség csökkentése egy bizonyos határig kedvezően befolyásolta a hatásfokot és a pontosságot. Az akadozó csúszást az anyagpárok megválasztásával, illetve a csúszó felületek kezelésével lehet csökkenteni. További megoldást kínál még a hidrodinamikus

siklócsapágy és a szilárdkenésű vezeték, illetve a hidrosztatikus vezetékek használata. Rezgéstani szempontból kedvezőek, mert nagy felületen képesek az ébredő erőket átadni, ezáltal nagy merevséget adva a szerszámgepeknek. Hátrányuk a csúszó-, és tapadó ellenállásból ered, amely határt szab a pontosságuknak és a sebességüknek. A pontosság növelése érdekében fejlesztették ki az LM (*Linear Motion*) rendszereket. Ennél a megoldásnál az egymáson elmozduló elemek között gördülőelemeket használnak. Működésük és méretezésük szempontjából a gördülőcsapágyakhoz hasonlónak kell tekinteni. Egyes géporsók rendelkeznek rezgésre hajlamos területekkel, amelyek instabil tartományokat jelentenek. A cél az, hogy a megmunkálásokat stabil zónákban végezzük el. Az instabil területeket kis változtatással, például a szerszám fordulatanak változtatásával könnyedén át lehet tolni a stabil területbe, ahol már el lehet végezni a forgácsolási feladatot.

3. ESETTANULMÁNY

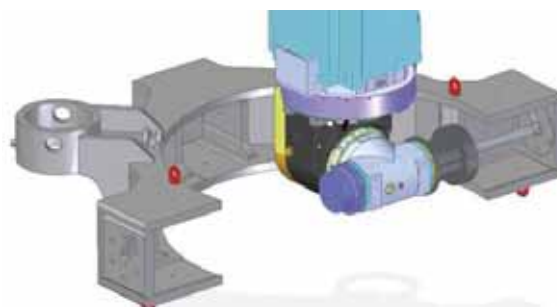
Az esettanulmányban egy nagyméretű hegesztett szerkezet megmunkálása volt a feladat. Az előgyártmány méreteiből adódóan annak megmunkálására egy portálmárgépen volt lehetőség (4. ábra). A megmunkálendő felületekhez hosszú szerszámokra volt szükség.



4. ábra. Az előgyártmány megmunkálása hosszú szerszámmal, megvezetés nélkül.

A technológiai paraméterek alacsonyan tartása ellenére a nagy szerszámkinyúlás és a szerelt szerszám nem kellő merevsége miatt a forgácsoló erő hatására olyan mértékű rezonancia lépett fel, aminek következtében a felülettel szemben elvárt minőségi mutatók tarthatatlanok voltak. A rezgések csökkentésének egyik megoldását a rezgéscsillapított szerszámok jelenthetik,

azonban ezek a kívánt hosszal nem állnak rendelkezésre jelenleg.



5. ábra. A szerszámvezető készülék koncepciójának 3D-s összeállítási modellje.

A probléma megoldását egy egyedi tervezésű, a portálmárgép főorsójához rögzített készülék jelentette (5. ábra). A szerszám hosszabbító szár megvezetését és támasztását a készülékházon belül támasztócsapágyazás valósította meg. Ezzel a megoldással a szerszám forgácsolás közbeni rezgésre való hajlama csökkenthető volt, így az előírt felületi minőségi követelmények tarthatók voltak.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben áttekintettük, hogy milyen rezgések keletkezhetnek a forgácsolás során, melyek azok a források, amik rezgésekért felelősek. A rezgések csillapítására a felületi minőségi követelmények miatt különös figyelmet kell fordítani, ellenkező esetben a káros rezgések kedvezőtlenül befolyásolják a gyártott alkatrész minőségét. A bemutatott példák jól ábrázolják, hogy hosszú kinyúlású szerszámoknál nagymértékben romlanak a rezgések okozta követelmények, melyekre léteznek már gyártói és tervezői megoldások is.

5. IRODALOM

- [1] *Machine Tool Vibrations*, In: Laperrière, L., Reinhart, G. (eds) CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014, ISBN 978-3-642-20616-0, doi:10.1007/978-3-642-20617-7_100264.
- [2] *Turning Tool Angles*, www.manufacturingguide.com/en/ordlista/turning-tool-angles
- [3] B. C. Gegg, C. Steve Suh, Albert Albert C.J. Luo: *Machine Tool Vibrations and Cutting Dynamics*, Springer New York, NY, 2011, ISBN 978-1-4419-9800-2 doi:10.1007/978-1-4419-9801-9
- [4] *Silent Tools™ Termelőkenység keskeny szerszámokkal*, Sandvik Coromant, 2016

AZ FDM ELJÁRÁS GYÁRTÁSI FOLYAMAT PARAMÉTEREINEK TERMIKUS ELEMZÉSE ÉS HATÁSA A MARADÓ FESZÜLTSEGEKRE

THERMAL ANALYSIS OF FDM PROCESS PARAMETERS AND THEIR EFFECTS ON RESIDUAL STRESS

Hussein Alzyod, *Budapest University of Technology and Economics, H-1111 Budapest Megyei rkp.3, Hungary, E-mail: hussein.alzyod@edu.bme.hu.*

Peter Ficzer, *Budapest University of Technology and Economics, H-1111 Budapest Megyei rkp.3, Hungary, E-mail: ficzere.peter@kjk.bme.hu.*

Lajos Borbas, *Budapest University of Technology and Economics, Department of Railway Vehicles and Vehicle System Analysis, and EDUTUS University, Technical Institution, Stúdium tér, Tatabánya H-2800, Hungary, E-mail: borbas.lajos@edutus.hu.*

ABSTRACT

This study focuses on the impact of printing parameters on residual stress in Fused Deposition Modeling (FDM) through numerical simulation. The research examines printing temperature, bed temperature, chamber temperature, and print speed as key parameters. By analyzing the results, it was determined that printing temperature had the most significant contribution in minimizing residual stress (59.3%), followed by chamber temperature (20.5%) and print speed (19.4%). Bed temperature was found to have minimal effect. The study provides valuable insights for optimizing FDM printing processes and reducing residual stress, thereby enhancing the quality and performance of FDM-printed components.

1. INTRODUCTION

Fused Deposition Modeling (FDM), a widely used additive manufacturing technique, has revolutionized the production of complex geometries and functional prototypes [1]. However, ensuring optimal part quality and mechanical performance remains a critical challenge [2]. One key factor that significantly influences the final properties of FDM-printed parts is the presence of residual stress [3], [4]. Residual in FDM refers to the internal stresses within a printed object after the printing process is completed. These stresses arise due to the thermal history and cooling dynamics experienced by the material during the FDM process. During FDM printing, thermoplastic filaments are heated and melted, and the molten material is extruded layer by layer to build the final object. As the material cools down and

solidifies, it undergoes thermal contraction, resulting in internal stresses within the printed part [5]. These stresses can be caused by non-uniform cooling, differential shrinkage, and variations in temperature across the layers and interfaces. Residual stress can significantly affect FDM-printed components' mechanical properties and dimensional accuracy [6]. High residual stress levels can lead to warping, distortion, and even cracking of the printed parts. Moreover, residual stress can affect the material's fatigue life, structural integrity, and performance under different loading conditions [7]. The 3D printing process involves the continuous application of heat to the uppermost layer of a printed object as subsequent layers are added sequentially. However, as each newly deposited layer joins the underlying layers, the lower layers begin to cool relative to the temperature of the extruded material. As thermal energy rapidly dissipates from the uppermost layer, it initiates a contraction process. However, due to the confinement imposed by the underlying layers, the top layer experiences limitations in its ability to contract or deform fully. Consequently, the interaction between the tendency of the material to shrink and the physical constraints exerted by the preceding layers gives rise to residual stress, and Figure 1 illustrates that. Consequently, heat is transferred from the top layer of the printed part through three distinct modes. Conduction serves as the initial mode of heat transfer, wherein heat is conveyed from the top layer to the underlying layers via direct physical contact. As the temperature gradient exists between the hotter top layer and the cooler lower layers, heat flows from the former to the latter, facilitating a

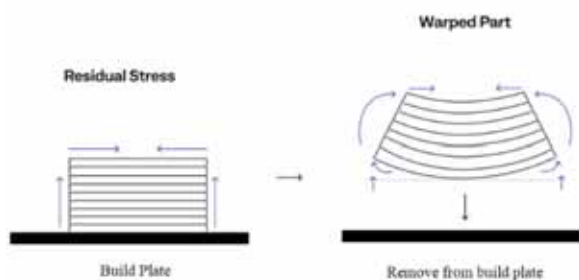


Figure 1. Internal generation of residual stress through thermal gradients in 3d printing

gradual decrease in temperature throughout the part. Convection, the second mode of heat transfer, occurs when the heat generated by the top layer causes the surrounding air to heat up. This heated air rises due to its reduced density, creating a convection current. This upward movement of hot air aids in carrying away heat from the printed object, ensuring effective cooling. Promoting convective heat transfer maintains a stable temperature distribution within the printing environment, mitigating issues such as excessive heat accumulation that could result in deformations or compromised print quality. Radiation constitutes the third mechanism through which heat is transferred from the top layer of the printed part. In this mode, heat energy is emitted from the top surface in the form of electromagnetic waves. These thermal radiation waves propagate through the surrounding air and are subsequently absorbed by nearby surfaces or the air itself. The radiation heat transfer rate is influenced by factors such as the temperature of the emitting surface, the material's emissivity characteristics, and the printed object's geometry. Radiative heat transfer aids in dissipating heat from the top layer, contributing to the overall cooling process. Understanding these various modes of heat transfer in 3D printing is essential for optimizing the process and improving the quality of printed objects. By carefully managing the heat transfer mechanisms, it is possible to achieve greater dimensional accuracy, minimize warping, and enhance the material properties of the printed parts. Adjusting printing parameters, such as layer thickness, print speed, chamber temperature, and material properties, allows for control over the heat transfer processes, thereby addressing concerns related to uneven cooling and residual stresses that may arise during the printing process. These stresses can adversely

affect the dimensional accuracy, structural integrity, and mechanical behavior of FDM-printed parts. Therefore, understanding the underlying thermal behavior and its relationship with process parameters is crucial in mitigating the impact of residual stress on the final product. This article aims to numerically delve into the thermal analysis parameters and investigate their influence on the residual stress of the FDM process using ABS material. Four key parameters will be explored: printing temperature, bed temperature, chamber temperature, and print speed. By examining the relationships between these variables and their impact on residual stress, we seek to provide valuable insights for enhancing the quality and performance of FDM-printed components.

2. SIMULATION PROCEDURE OF FDM

2.1 Material, sample, and printing parameters

The ABS filament utilized in this research was acquired from e-Xtream Engineering, Hexagon's Manufacturing Intelligence division. The filament employed was unfilled, amorphous, and possessed a natural color. A 3D cuboid model, measuring 60 mm in length, 30 mm in width, and 10 mm in height, was designed using computer-aided design (CAD) software, as depicted in Figure 2. The rest parameters were set as shown in Table 1.

Table 1. Fixed printing parameters values

Printing parameter	value
Layer thickness (mm)	0.2
Nozzle head (mm)	0.4
Infill density (%)	100
Infill pattern	Zig zag
Raster angle (°)	0
Infill orientation	X-axis
Build direction	Flat

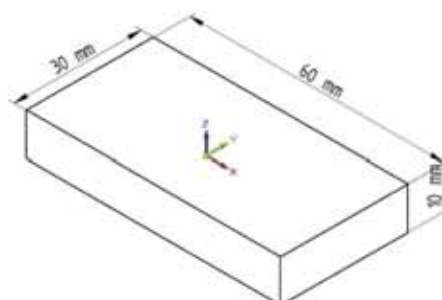


Figure 2. Used sample dimensions

2.2 Design of experiment and optimization methodology

To comprehensively investigate the influence of process parameters on FDM, the adoption of systematic Design of Experiments (DOE) techniques such as Taguchi's orthogonal design, Box-Behnken Design (BBD), Response Surface Methodology (RSM), and Central Composite Design (CCD) is imperative [8]. Employing these methods ensures a well-structured and systematic framework for assessing the impact of multiple input variables on a single output variable, enabling precise characterization of the response surface and identification of optimal parameter configurations [9]. In this study, Taguchi L9 orthogonal array was employed to analyze the four parameters and their levels, and Table 2 depicts these parameters. Means graphs and Signal to Noise (S/N) ratio are tools for minimizing process variability and response values [10].

Table 2. Factors and levels of simulation

Parameter	Unit	Levels		
		1	2	3
Printing Temp. (PT)	°C	225	230	235
Bed Temp. (BT)	°C	87	90	93
Printing speed (PS)	mm/s	30	45	60
Chamber Temp. (CT)	°C	37	40	43

Following the investigated variable, the selection of the S/N ratio is tailored to the study's specific needs. In this research, the focus is on minimizing the residual stress of the samples, making the S/N ratio of the 'smaller is better' type the appropriate choice for evaluation [11], [12].

2.3 Numerical simulation

The investigation employed the Computer-Aided Engineering (CAE) tool Digimat-AM to analyze the additive manufacturing (AM) processes. Digimat-AM is a comprehensive software platform for collecting data on mechanical characteristics and simulating AM of composites and polymers. Its four-stage process, namely definition, manufacturing, simulation, and results, enables the analysis of warpage and residual stresses in printed parts.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Incorporating Taguchi L9 Orthogonal Array: Analysis of Simulation Results in Table 3. The

experimental investigation delves into the residual stress of ABS FDM printed parts, unveiling significant variations in residual stress with varying printing parameters. Additionally, an in-depth statistical analysis employing ANOVA is performed to ascertain the extent of influence exerted by these parameters on the residual stress exhibited in the printed components, and Figure 3 shows the S/N ratio graph. The significance of printing factors on individual responses was assessed through an ANOVA conducted at a 95% confidence level.

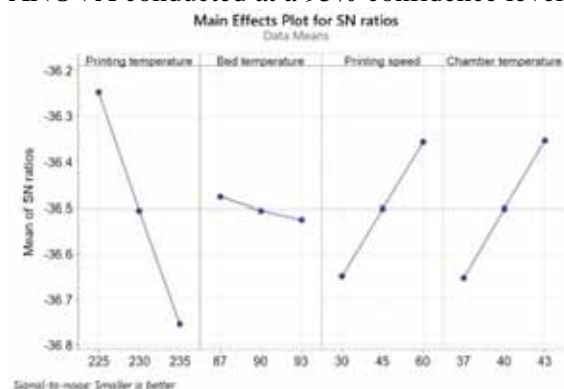


Figure 3. S/N ratio plot for residual stress

Table 3. DOE results using L9

Run	PT	BT	PS	CT	Residual stress [MPa]
1	225	87	30	37	66.97
2	225	90	45	40	64.94
3	225	93	60	43	62.92
4	230	87	45	43	65.54
5	230	90	60	37	66.94
6	230	93	30	40	68.19
7	235	87	60	40	67.46
8	235	90	30	43	68.81
9	235	93	45	37	70.2

The ANOVA results, presented in Table 4, facilitated the calculation of each parameter's contribution percentage in reducing residual stress. Notably, the printing temperature emerged as the most influential factor, contributing 59.3% towards minimizing residual stress. Subsequently, chamber temperature and printing speed contributed substantially, accounting for 20.5% and 19.4%, respectively. Conversely, the effect of bed temperature was insignificant, contributing less than 1%. Consequently, minimizing residual stress can be achieved by adopting specific parameter values: a printing temperature of 225 °C (first level), a

bed temperature of 87 °C (first level), a printing speed of 60 mm/s (third level), and a chamber temperature of 43 °C (third level).

Table 4. ANOVA for individual responses

Source	DF	Seq SS	Contribution %	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
PT	1	23	59.3	23	23	28777	7x10 ⁻⁹
BT	1	0	0.8	0	0	381	4.05x10 ⁻⁵
PS	1	7	19.4	7	7	9392	6.8x10 ⁻⁰⁸
CT	1	8	20.5	8	8	9937	6.1x10 ⁻⁰⁸
Error	4	0	0.0				
Total	8	39	100				

4. CONCLUSION

FDM is a widely used additive manufacturing technique known for its ability to create complex geometries and functional prototypes. However, residual stress remains a significant challenge in achieving high-quality parts. Residual stress in FDM refers to internal stresses within printed objects caused by thermal gradients and cooling dynamics. These stresses can negatively affect mechanical properties and dimensional accuracy. Understanding heat transfer mechanisms like conduction, convection, and radiation is crucial for optimizing printing. Numerical simulation using Digimat-AM software investigated the influence of printing parameters on residual stress. Results showed that printing temperature had the most significant impact (59.3%) in minimizing residual stress, followed by chamber temperature (20.5%) and print speed (19.4%). Bed temperature had an insignificant effect. Specific parameter values were recommended to minimize residual stress, improve quality, and enhance FDM-printed parts. This research provides valuable insights for optimizing printing parameters and managing heat transfer to reduce residual stress and improve overall performance.

5. REFERENCES

[1] H. Alzyod and P. Ficzer, "The Influence of the Layer Orientation on Ultimate Tensile Strength of 3D Printed Poly-lactic Acid," *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 16, no. 3, pp. 361–367, 2022.

[2] H. Alzyod, J. Takacs, and P. Ficzer, "Improving surface smoothness in FDM parts through ironing post-processing," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, p. 073168442311730, Apr. 2023, doi: 10.1177/07316844231173059.

[3] H. Alzyod and P. Ficzer, "Finite Element Modeling of Additive Manufacturing in Case of Metal Parts," *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, vol. 50, no. 4, pp. 330–335, Aug. 2022, doi: 10.3311/PPtr.19242.

[4] A. Dasgupta and P. Dutta, "A Comprehensive Review on 3D Printing Technology: Current Applications and Challenges," *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 529–542, 2022.

[5] O. O. Agboola *et al.*, "Optimization of heat treatment parameters of medium carbon steel quenched in different media using Taguchi method and grey relational analysis," *Heliyon*, vol. 6, no. 7, p. e04444, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04444.

[6] P. Ficzer, L. Borbas, and G. Szebenyi, "Reduction possibility of residual stresses from additive manufacturing by photostress method," *Mater Today Proc*, vol. 4, no. 5, pp. 5797–5802, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.06.048.

[7] H. Alzyod and P. Ficzer, "RESIDUAL STRESSES IN ADDITIVE MANUFACTURING," *GÉP LXXII*, vol. 3–4, pp. 41–44, 2021.

[8] J. A. Taborda-Ríos, O. López-Botello, P. Zambrano-Robledo, L. A. Reyes-Osorio, and C. Garza, "Mechanical characterisation of a bamboo fibre/poly-lactic acid composite produced by fused deposition modelling," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 39, no. 23–24, pp. 932–944, Dec. 2020, doi: 10.1177/0731684420938434/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0731684420938434-FIG10.JPEG.

[9] H. Alzyod and P. Ficzer, "Optimizing fused filament fabrication process parameters for quality enhancement of PA12 parts using numerical modeling and taguchi method," *Heliyon*, vol. 9, no. 3, p. e14445, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14445.

[10] S. Palaniyappan, D. Veeman, N. kumar Sivakumar, and R. Shanmugam, "Optimization of compressive property for the development of triply periodic minimal surface lattice structure on poly-lactic acid polymeric material," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, May 2022, doi: 10.1177/07316844221099582/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_07316844221099582-FIG14.JPEG.

[11] C. C. Ikeagwuani, D. C. Nwonu, C. K. Ugwu, and C. C. Agu, "Process parameters optimization for eco-friendly high strength sandcrete block using Taguchi method," *Heliyon*, vol. 6, no. 6, p. e04276, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04276.

[12] D. Veeman, S. Palaniyappan, G. J. Surendhar, and R. Shanmugam, "Process optimization of compressive property and dimensional error on wood poly-lactic acid gyroid-structured polymer composite," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, May 2022, doi: 10.1177/07316844221096486/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_07316844221096486-FIG11.JPEG.

A cikk a VIII. Gépészeti Szakmakultúra Konferencián lett bemutatva.

LENDÍTŐKERÉK-RÖGZÍTŐ CSAVAROK MEGHIBÁSODÁSÁNAK ELEMZÉSE

FAILURE ANALYSIS OF FLYWHEEL RETAINING BOLTS

*Dr. Jálics Károly, egyetemi docens
Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet*

ABSTRACT

The current paper aims to show the importance of the proper tightening process of bolted joints. Through a real life example, i.e. the damage of flywheel retaining bolts of an internal combustion engine, the damage process of the joint will be shown and conclusions will be drawn regarding the causes of the damage.

1. BEVEZETÉS

Gázmotoros kombinált ciklusú erőművek országosan sok helyen üzemelnek. A villamosenergia termelése mellett a belsőégésű motor egyébként veszteségbe menő hőjének felhasználása is sokszor megtörténik. A veszteségével hőcserélőn keresztül meleg vizet állítanak elő, pl. fűtésre, vagy a biogáz előállító fermentorok fűtését valósítják meg.

Gázmotorok sokféle méretben épülnek 4 hengertől egészen 24 hengerig, és ezekhez csatlakozik rugalmas tengelykapcsoló közbeiktatásával az áramtermelő generátor. A gázmotor is belsőégésű motor, amelyet a hengerszám és – elrendezés, valamint a forgattyúcsapok elékelési szögének, a gyújtási sorrend függvényében többé – kevésbé egyenetlen járás jellemez.

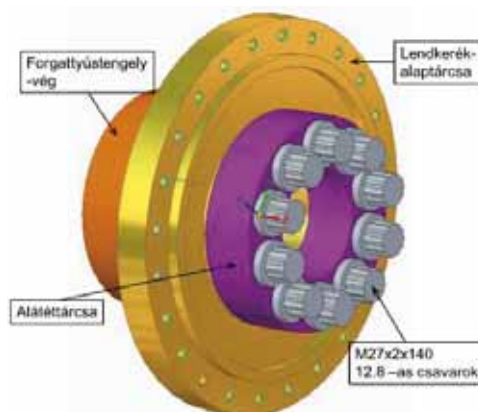
Ezt hivatott részében kiegyenlíteni a lendítőkerék, amelyet a forgattyús tengely generátor felőli oldalára rögzítenek általában csavarkötéssel. Ezen csavarkötések megfelelő meghúzása, állapota elengedhetetlen feltétele a motorok hosszútávú hibamentes üzemeltetésének. A továbbiakban egy ilyen csavarkötés meghibásodását, ill. ennek lehetséges okait mutatom be.

2. A VIZSGÁLT CSAVARKÖTÉS BEMUTATÁSA ÉS MEGHIBÁSODÁSA

A kérdéses csavarkötés egy 12 hengeres V elrendezésű biogáz motoron található. A lendítőkerék tárcsát a 12.9 anyagminőségű csavarok (10 db, M27x2 x 140) egy alátét tárcsán keresztül rögzítik a forgattyús tengelyben kialakított zsákfuratokhoz (1. ábra).

Az esetet az teszi különösen érdekessé, hogy a motor nagyjavításon esett át mintegy 6000

üzemórával a csavarok károsodása előtt, ahol mind a 10 csavart gyári újra cserélték. A szemrevételezésből megállapítható, hogy a csavarok a főtengety tárcsa és a lendítőkerék csatlakozási felület síkjában, gyakorlatilag az első terhelt menetnél törtek el (2. ábra). A csavarmenetek terhelésvétele a mérnöki gyakorlatban jól ismert, de természetesen a vonatkozó irodalom is részletesen tárgyalja.

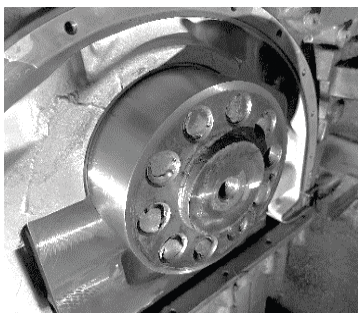


1. ábra: A csavarkötés felépítése

A szemrevételezésből megállapítható, hogy a csavarok a főtengety tárcsa és a lendítőkerék csatlakozási felület síkjában, gyakorlatilag az első terhelt menetnél törtek el (2. ábra). A csavarmenetek terhelésvétele a mérnöki gyakorlatban jól ismert, de természetesen a vonatkozó irodalom is részletesen tárgyalja.

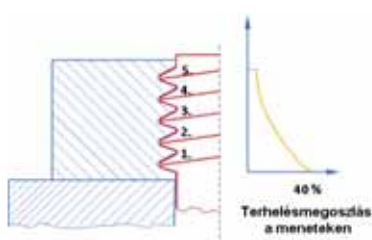
A motort az elektronikus szabályozórendszere 54444 üzemóránál fordulatszám mérési hibára hivatkozva megállította, a motor újraindítása nem volt lehetséges. A további vizsgálatok észlelték az előző fejezetben bemutatott 10 db csavar törését.

Az esetek 60 - 65 % -ban a törés az első teherviselő menetnél történik. A menetprofil, mint éles horony hatásán túl az első menetben lévő erőkoncentráció (3. ábra) a fő oka a csavarok alacsony kifáradási határának. A hagyományos csavarkötések szokásos kialakításánál a menetek nincsenek egyenletesen terhelve.



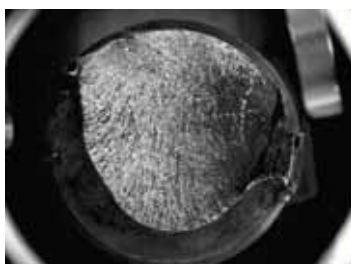
2. ábra: A forgattyústengely-vég a beletört csavarokkal

A 3. ábrán látható, hogy az első teherhordó menet a teljes csavarerő több mint 1/3 át veszi fel, a fáradásos csavartörés ezen a helyen várható leginkább.



3. ábra: A csavarmenetek teherviselésének eloszlása

Fénymikroszkóp segítségével enyhén nagyított képet készítve a csavarok töretfelületeiről megállapítható, hogy megfigyelhető a repedés kezdete, ezen kívül nagyfelületű fáradt törési felületek láthatók, míg kisebb felületek általában a keresztmetszet egyik szélén rideg törésképet mutatnak (4. ábra).



4. ábra: Egy kiválasztott csavar töretfelülete

3. A CSAVARKÖTÉS MECHANIKAI VIZSGÁLATA

Az 5. ábra mutatja sematikusan a különböző ciklikus feszültségek hatására kialakuló kifáradási töretfelületeket, nagy és kis névleges feszültségek esetén vázlatosan hornyos és horony nélküli kör keresztmetszetű rudaknál. A világos színnel jelölt töretfelületek a fáradt törési területet, a sötét töretfelület a rideg törést jelölik.

Összehasonlítva az 4. ábra töretfelülete az 5. ábra sematikus töretfelületeivel észrevehető, hogy a jobb oldali 3 oszlopban látható képekhez tudjuk hasonlítani a valós töretfelületeket. Mivel a métermenet éles menet, ezért a táblázatból az éles horony (scharfe Kerbe) oszlopát kell figyelembe venni. Felül szerepel továbbá az alacsony névleges feszültség (niedrige Nennspannung).

Az 5. ábra fekete körrel jelölt töretfelületeit arra utalnak, hogy a törés terjedésekor a csavarfeszültség már alacsony volt. Mint az ábrából látható, magas csavarfeszültség esetén a fáradt töretfelületek lényegesen kisebbek lettek volna. Ez arra utal, hogy a csavarok üzemi ereje (és a fellépő feszültség), amelyet a csavarok megfelelő meghúzásakor állítunk be a fáradt törés terjedése során alacsony volt, azaz vagy a motor működése során a csavarok meglazultak, vagy már szereléskor nem érték el a szükséges üzemi erőt, tehát nem húzták meg megfelelően őket (a kettő kombinációja is előfordulhat). Az, hogy a kettő közül melyik, azt csak a további vizsgálatok elvégzése után tudjuk megmondani.

hohe Nennspannung			niedrige Nennspannung		
ungekerbt	milde Kerbe	scharfe Kerbe	ungekerbt	milde Kerbe	scharfe Kerbe
Rundstäbe					
Zug und Zug – Druck					
einsinnige Biegung					
Hin – Herbiegung					
Umlaufbiegung					
alternierende Torsion					

5. ábra: Köracélok makroszkopikus töretfelületeinek sematikus ábrázolása [3]

A csavarokat nyomatékulccsal egy nyomatéksokszorozó közbeiktatásával húzták meg az előírás szerint összesen 3 lépésben az előírt csavarozási sorrendben. Először 100 Nm nyomatékulccsal, második lépcsőben 300 Nm nyomatékulccsal, végül 120° szögre húzással.

Olyan helyeken, ahol az összeszorító erőt pontosan kell beállítani (a vizsgált alkalmazás is ilyen), a csavarokat a rugalmassági határon túl feszítik elő. Erre azért van szükség, mert a meghúzási szög mérésének pontatlansága van. A rugalmas tartományban meghúzott csavar esetén még igen kis szögelfordulásváltozás is nagymértékű csavarerő változást eredményez, tehát a csavarerő beállítás pontatlan lehet.

Ezért a csavarokat a rugalmas tartományon túl húzzák, ahol a csavarerő változása a szögelfordulás függvényében ellaposodik, így a szögelfordulás változására a csavarerő csak kismértékben változik. Ezzel a módszerrel tehát pontos összeszorító erő beállítás lehetséges. Annak érdekében, hogy a csavarkötés ne lazuljon meg, igen fontos az összeszorító erő helyes tervezéskori megválasztása, és a szereléskor helyes beállítása (megfelelő meghúzási nyomaték, és/vagy szöggel). Rosszul megválasztott összeszorító erő esetén az összenyomott felületek felületi érdességei, egyenetlenségei maradó alakváltozást szenvednek, ami az összeszorító erő csökkenését eredményezi és végeredményben a csavarkötés meglazulásához vezet. Mivel a szögelfordulás viszonylag kis ráfordítással mérhető, ezért ez a módszer nem sokkal költségesebb, mint a nyomtécra húzás, de nagyobb pontosságú.

Ez előbb leírtak alapján a csavarkötéssel kapcsolatban négyféle ellenőrző számítást kell elvégezni:

- A csavarkötés ellenőrzése a súrlódással átvihető nyomtécra.
- A csavarkötés ellenőrzése a csavarok nyírásával átvihető nyomtécra.
- A csavarokban az előírt módon történő meghúzással fellépő feszültségre.
- Felfekvő felületek felületi nyomásra történő ellenőrzése.

Az ellenőrző számítások alapján megállapíthatjuk, hogy a csavarkötés a vizsgált négy feltételnek megfelel. Tehát a csavarokkal összeszorított tárcsák az előírt meghúzási nyomtécokkal és szöggel nagy biztonsággal a tárcsák közti súrlódással átviszik a motor nyomtécát, esetleges nyírásra történő igénybevétel esetén is sokszorosan túlbiztosítottak, a csavarokban meghúzáskor fellépő feszültség nem lépi túl a csavar szakítószilárdságát (de vélhetően a rugalmassági határt igen), és végül az alátét tárcsa a csavarfej nyomása miatt kialakuló felületi nyomás is határérték alatti. Az alkalmazott csavarkötés mérete, anyagválasztása az adott feladat ellátásához tehát megfelelő volt.

A csavarkötés konstrukcióját vizsgálva észrevehetünk azonban néhány tervezési hiányosságot, amely hozzájárulhatott a csavarok idő előtti töréséhez.

1. A kérdéses csavarkötésben normál csavarszárú nagyszilárdságú csavart alkalmaztak magra gyengített csavar helyett. A magra gyengített csavar egy nagy szilárdsági osztályú, mérhetően rugalmasan nyúló csavar. A vékony és különösen hosszú szárnak köszönhetően

csavarkötésben előfeszített húzórugóként viselkedik. A megfeszített csavarszárnban a meghúzáskor keletkező húzóerő csak kismértékben csökken, ha a csavarkötés később a képlékeny alakváltozás miatt enged. A megfelelő csavarkötés ezért további lazulás (elcsavarodás) elleni védelem nélkül is megoldható, nem tud kilazulni, ezért önzáró. Az alkalmazott csavarok nem ilyenek voltak, tehát érzékenyebbek a fáradásos törésre.

2. A csavarkötés tartóssága szempontjából kiemelten fontos a számítás szerint szükséges előfeszítés alkalmazása. Ez különösen a dinamikus terhelte csavarokra vonatkozik. A bizonytalansági tényező a csavarfej súrlódása.
3. A csavar összetett igénybevétele: Meghúzás közben a csavart húzó és csavaró igénybevétel terheli. A csavaró igénybevétel a csavarfej és az összeszorított elem, valamint a menetek közti súrlódásból adódó súrlódó nyomtéc. Ha a csavaró igénybevételt kiküszöböljük, akkor a csavarszárat csak húzó igénybevétel éri, így nagyobb előfeszítő erő hozható létre meghúzáskor. Léteznek erre különleges megoldások.

4. AZ ÖSSZESZORÍTOTT ALKATRÉSZEK VIZSGÁLATA

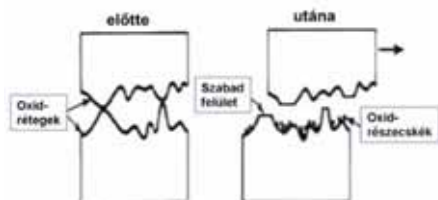
A már korábban említett módon (az 1. ábra szerint) a lendítőkerék felülete érintkezik a forgattyús tengely karimájával, valamint a másik oldalról az alátét tárcsa megfelelő felületével.

Megvizsgálva ezeket a csatlakozó felületeket, már a motor károsodás utáni szétszereléskor, a felületeken korrózió nyomait fedezhetjük fel. Mivel erre a helyre korrozív közeg nem kerülhet, ezért a korrózió különleges fajtája, az illesztési korrózió (fretting) lépett fel.

Az illesztési korrózió az érintkező terhelte felületek korróziós károsodása, miközben a felületek kis, érintőirányú oszcilláló mozgásokat végeznek. A kopást az érintkezési felületi érdességcsúcsok összetapadása okozza, amelyek később a kis mozgás hatására ismét megszakadnak. A relatív csúszó mozgás amplitúdója gyakran mikrométertől milliméterig terjed, de akár a nanométer tartományba is előfordulhat.

Ekkor a finom részecskék, töredékek kopnak le az egyik vagy mindkét anyagból. Ezek a töredékek kemény, koptató hatású részecskévé oxidálódnak, amelyek tönkre teszik a fémfelületet (6. ábra).

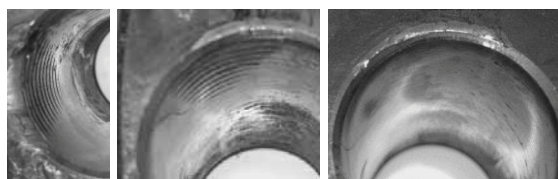
A motor üzemi rezgései legalább is részben felelőssé tehetőek a csavarkötések fellazulásáért. Csavarkötések nem megfelelő csavarbiztosítás miatt (de előírászerűn meghúzva!), az összeszorított alkatrészek csavartengelyre merőleges rezgése miatt gyorsan meglazulhatnak (a vizsgált csavarkötést is elsősorban ilyen jellegű terhelés ér), akár néhány másodperc alatt is, megfelelő keresztirányú rezgés hatására.



6. ábra: Az illesztési korrózió kialakulása

Létezik egy vizsgálat csavarkötések lazulására vonatkozóan, ez a Junker-féle teszt, amellyel részletesen a DIN 65151 (Luft- und Raumfahrt - Dynamische Prüfung des Sicherungsverhaltens von Schraubverbindungen unter Querbeanspruchung (Vibrationsprüfung)) német szabvány foglalkozik. Ezzel a teszttel elvégzett mérési eredmények mutatják, hogy a megfelelően meghúzott csavarkötés is képes másodpercek alatt fellazulni, ha nem megfelelő csavarbiztosítást használunk.

A lendítőkerék tárcsa néhány furatában, a tárcsa forgási irányába mutató oldalán, a csavar menetétől származó, a lenyomatok vannak. Két szomszédos furat esetén kifejezett lenyomatokról van szó, egy harmadik, szintén szomszédos furat esetén még éppen kivehető a menet lenyomata (7. ábra).



7. ábra: Menet lenyomatok a lendítőkerék tárcsa furataiban

A lenyomatok jelenléte arra utal, hogy egy nem meghatározható ideig, csak ez a három csavar, nyírásra (és hajlításra) igénybevéve vitte át a motor nyomatékát. A többi csavar vagy már eltörött, vagy már lényegesen kisebb összeszorító erőt biztosított az előírtnál, azaz meglazultak.

Mivel a vizsgált motor esetén az összeszorított elemek bizonyíthatóan egymáshoz képest relatív mozgást, és a csavarok hossztengetelyre merőleges rezgést végeztek, ezért

a csavarkötések a motor üzeme közbeni fellazulása nem zárható ki.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A V12 felépítésű motorok üzem közben fellépő, a motormechanikából, gázerőkből stb. adódó rezgései (hosszanti, kereszt, függőleges és torziós) az összes motortípusénál lényegesen jobbakk. Természetesen rezgések ennek ellenére jelen vannak, amelyek hozzájárulhatnak, de nem okozhatják egyedülként a csavarok lazulást 6000 üzemóra alatt. Annál inkább sem, mivel az eredeti gyári csavarok mintegy 48000 üzemórát üzemeltek hibátlanul.

Lehetséges azonban az is, hogy a nem megfelelően beállított összeszorító erő miatt a motorrezgések képesek voltak a tárcsákat egymáshoz képest elmozdítani, amelyek további, végzetesnek bizonyuló csavarlazulást okoztak.

Az a tény, hogy a motor a csavartörés előtt csak kb. 6000 üzemórát járt az újonnan beépített csavarokkal, inkább ez utóbbit valószínűsíti. Megvizsgálva a javítás előtti és utáni rezgésmérési eredményeket, nem találunk említésre méltó eltéréseket az össz- rezgésebesség értékei között, és a vizsgált spektrumok sem adnak részletesebb tájékoztatást a káresemény bekövetkezéséről

E helyen hívom fel a figyelmet a csavarkötés méretezésére akár a vége-selemes módszert segítségül hívva is [4] még a tervezési fázisban, amellyel a hasonló káresemények elkerülhetők.

IRODALOM

- [1] Reichle. M.: Scharaubenverbindungen, DHBW Stuttgart,
- [2] Konecki, K., Talaska, K.: Analysis of Wedge Lock Washer using the Finite Element Method, MATEC Web Conf. 357 02025, 2022, DOI: 10.1051/mateconf/202235702025
- [3] Macherauch, E., Zoch, H.W.: Praktikum in Werkstoffkunde, Vieweg + Teubner, 11. kiadás, 2011, p.407.
- [4] Sarka, F. (2023). Examination of Bolt Connection with Finite Element Method. In: Jármái, K., Cservenák, Á. (eds) Vehicle and Automotive Engineering 4. VAE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_19

IPARI TECHNOLÓGIÁK FEJLESZTÉSE AZ ÉRTÉKMÓDSZERTAN (VALUE METHODOLOGY) ALKALMAZÁSÁVAL

DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES USING THE VALUE METHODOLOGY

*Dr. Keszi- Szeremlei Andrea Ph.. D. /Dunaújvárosi Egyetem, /keszia@uniduna.hu
Dr. Nádasdi Ferenc, Ph.D. / Dunaújvárosi Egyetem, Emeritus Professzor/nadasdi.ferenc@gmail.com*

ÖSSZEFOGLALÁS

A „Fenntarthatóság” megvalósítása és folyamatos fejlesztése új keretrendszer kialakítását igényli. Új feladatnak javasolható a jelenlegi ipari technológiák fejlesztése, kiemelten a „Fenntarthatóság” követelményei szerint. Az elmúlt évtizedekben forradalom játszódott le a menedzsment területén, és kialakultak olyan új menedzsment módszerek, amelyek alapvetően a szellemi tudást felhasználva, hasznos eszközzé váltak az innováció területén. Ezen módszerek közül bemutatásra kerül az értékelemzés (Value Analysis) egy ipari technológia fejlesztésében.

ABSTRACT

The implementation and continuous development of "Sustainability" requires the creation of a new framework. The development of current industrial technologies can be proposed as a new task, especially according to the requirements of "Sustainability". In recent decades, a revolution has taken place in the field of management, and new management methods have emerged, which basically use intellectual knowledge and have become a useful tool in the field of innovation. Among these methods, Value Analysis is presented in the development of an industrial technology.

1. BEVEZETÉS

Kutatásaink szerint az értékmódszertan alkalmas a „Fenntarthatóság” követelményeit beépíteni az értékelemzés rendszerébe. A beépítés során meghatározható a „Fenntarthatóság” indikátoraiból levezetett követelmények, amelyeket a termék, illetve a technológia elemzése során célként célszerű meghatározni.

A gépiparban elsősorban a következő területek kiemelése célszerű:

- A gépiparban előállított termékek feleljenek meg a „Fenntarthatóság” indikátorainak.
- A „Fenntarthatóság” követelményeinek betartása a technológiáknál már nehezebb feladat. Az ipari technológiák életciklusa általában 15-20 év, kialakítása, fejlesztése hatalmas beruházást igényel. [11]

Tapasztalataink szerint a gépiparban a gyártmánytervezés/gyártmányfejlesztés és a technológiatervezés/technológiafejlesztés egymásra épül. A gyártmány igényhalmaza mintegy 80 %-ban a vevőigényből származik, a fennmaradó mintegy 20 % a hazai és a nemzetközi szabályokból, törvényekből, a stakeholderok (befolyásos személyek, csoportok stb.) igényeiből vezethetők le. A gyártmányfejlesztés általában együtt jár a technológia fejlesztésével is. Ha a változtatások a technológia „határain belül” valósítható meg, akkor a gyártmányfejlesztés megvalósítható.

A technológiák igényrendszere mintegy 80 %-ban a gyártmányból vezethető le. A további mintegy 20% a gyártmánynál megadott feltételek szerint valósulhat meg.

A következőkben egy technológia elemzése kerül bemutatásra. Magyarországon a politikai – gazdasági vezetés a „Fenntarthatóság” megvalósítását támogatja a rendelkezésre álló erőforrásokkal. Az elemzésben kísérletet tettünk „Fenntarthatóság” egyes indikátorainak megjelenítésére. [16]

2. PRÉSGÉP EXCENTER TENGELYÉNEK CSAPÁGYHELYEI FELÚJÍTÁSÁNAK FEJLESZTÉSE AZ ÉRTÉKELEMZÉS MÓDSZERÉNEK ALKALMAZÁSÁVAL

2.1. A projekt célja

A tengely kopását termikus fémszórással állítja helyre a cég. A technológia értékelemzéssel történő fejlesztésével a következő célok elérését tűzte ki a vezetés:

- Felületminőségi hibák megszüntetése,
- A helyreállítási technológia munkaerő, anyag- és energiafelhasználásának csökkentése,
- A karbantartás fejlesztése a helyreállítási technológia alkalmazásának ütemezésére,
- A piaci versenyhez történő hatékonyabb alkalmazkodás biztosítása.

A vezetés a következő kérdésekre keresett választ:

K1: Tengely kopása esetén mi a célszerűbb, új excenter legyártása, vagy a tengely javítása? (Új tengely vásárlása nem volt lehetséges.)

K2: Hogyan lehet elkerülni a tengely kopása miatt a váratlan leállásokat?

K3: A tengely felújítását milyen más módszerrel lehet megoldani? [2], [3], [4], [7], [8]

2.2. A projekt tárgya

Az értékelemzés tárgya a termikus fémszórás fejlesztése

A termikus szórások az egyes alkatrészek javításában fontos technológiának tekinthetők. Az új fedőréteg és az alkatrész felülete között kohéziós vagy adhéziós kapcsolat alakul ki a fémes, vagy nemfémes jellegtől függően. Az új fedőréteg lehet fém, fémötvözet, karbid vagy műanyag. Az ilyen jellegű új típusú fedőréteg alkalmazása lehetővé teszi az adott alkatrész élettartamának jelentős meghosszabbítását. A bemutatott példában az excenter tengelyt elektromos ívhuzalszórással állítottak helyre.

A technológia 3 fő szakaszra tagolható:

- előkészítés (szórandó felület előkészítése),
- anyagfelvitel (alapozó réteg szórása, fedőréteg szórása),
- készre gyártás. [1], [5], [6]

A felvitt réteggel szemben a következő igények merültek fel:

IFR1 Az alapanyaggal azonos vagy nagyobb keménység.

IFR2 Megfelelő kopásállóság.

IFR3 Kis súrlódási tényező.

IFR4 Kis repedési hajlam.

IFR5 Hőállóság az üzemi hőmérsékleten.

IFR6 Jó hővezető képesség és a hőtágulás jó illeszkedése az alapanyag azonos tulajdonságaihoz.

IFR7 Korrózióállóság a korróziót létrehozó közeggel szemben.

2.3. A termékkel kapcsolatos funkcióelemzés (excenter tengely)

F0 Nyomatékot átad

F1 Alternáló mozgást végez

F11 Siklócsapággal egységet alkot

F12 Siklócsapágyat forgat

F13 Siklócsapágyat rögzít

F2 Tartóssági követelményeket kielégít

F21 Mechanikai hatásoknak ellenáll

F22 Korróziós hatásoknak ellenáll

F3 Szerelhetőséget biztosít

F4 Méreteket betart

F5 Tengelyhez kapcsolódó alkatrészeket rögzít (csapágyak, bordásszij, tárcsa)

2.4. A technológiával szembeni igények a következők:

I1 Betartani a felújítandó munkadarab előírt méreteit

I2 Szennyeződést távolítsa el a felszórandó felületről

I3 A szórt réteg tapadását tegye lehetővé

I4 A zsugorodási feszültségeket csökkentse

I5 A felületre esetleg lecsapódott párát távolítsa el

I6 Az alapozó és a fedő réteg feljuttatása közti időt minimalizálja

I7 Biztosítsa a bevonat egyenletességét

I8 Szabályozható legyen az eljárás

I9 A minőség ellenőrizhető legyen

I10 Méret pontos megmunkálást tegyen lehetővé

I11 A fenntartható fejlődés indikátorait érvényesíti (12 Felelős fogyasztás és termelés)

I12 Betartsa a környezetvédelmi előírásokat

2.5. A technológia funkciói:

A technológia funkciói:

- F0 Csapágyhelyet felújít
- F1 Alkatrészt előkészít
 - F11 Szennyeződést eltávolít
 - F12 Felületet lemunkál, érdesít
- F2 Felületet érdesít – korundot felszór
- F3 Alapozó réteget felvisz
 - F31 Alapozó anyagot biztosít
 - F32 Alapozó réteget felvisz
- F4 Fedőréteget felvisz
 - F41 Fedőréteget biztosít
 - F42 Fedőréteget felvisz
 - F43 Fedőréteget készre munkál
- F5 Visszaszerelést lehetővé tesz
 - F51 Méretet ellenőriz
 - F52 Felületet vizsgál
- F6 Szállításra alkalmassá tesz
 - F61 Sérüléstől véd
 - F62 Környezeti hatásoktól megóv
- F7 Irányítást végez
 - F71 Anyagot mozgat
 - F72 Környezetet véd
- F8 Karbantartást biztosít
- F9 Környezetvédelmi előírásokat betart
- F10 Munkavédelmi előírásokat betart
- F11 Hulladékot kezel
- F12 Hulladékot eltávolít [9], [12], [13], [14], [15], [17], [18], [19].

3. GYENGE PONTOK MEGHATÁROZÁSA

3.1. Költségkritikus pontok

Költségkritikus pontnak tekinthető a tengely javítása és a legyártása közötti választás. Az új tengely gyártásának és a tengely helyreállításának mutatóit az 1.sz. ábra tartalmazza.

1.táblázat: Új tengely gyártásának és a tengely helyreállításának mutatói

Mutatók	Új tengely gyártása	Tengely helyreállítása
Időszükséglet óra/db	43,6	6,7
Költség %	465%	100 %

Forrás: [5], [6]

3.2. Funkciókritikus pont

A tengely felújítására többféle technológia áll rendelkezésre. Javasolható az egyes technológiák kipróbálása, esetleg a jelenlegi technológia lecserélése.

A működés váratlan leállása nehéz helyzetbe hozhatja a vállalatot, például határidős munka esetén.

4. JAVASLATOK A TECHNOLÓGIAI FOLYAMAT FEJLESZTÉSÉRE

- A tengely meghibásodása esetén a javítást célszerű alkalmazni.
- A váratlan leállások érdekében a karbantartás fejlesztése javasolható. Statisztikai felmérés alapján meghatározható az a működési időtartam (működés órában), amikor még nem következett be a kopásból eredő leállás, de célszerű a javítást elvégezni.
- A tengely javítására többféle eljárás alkalmazható, ezért célszerű több eljárást kipróbálni.
- A javítások során – és a berendezés használata során – veszélyes hulladék keletkezhet. Gondoskodni kell a hulladék összegyűjtéséről és a gyűjtőhelyre történő elszállításról.

5. EREDMÉNYEK

Az értékelemzés alkalmazása elősegítette, hogy elemezzünk egy technológiát. Egy tengely javítása nem tűnik túlságosan bonyolult feladatnak. A gyakorlat azonban azt bizonyítja, hogy egy tengely nem tervezett, váratlan leállása jelentős problémát jelenthet egy megrendelés teljesítésében. A funkcióelemzés lehetővé tette, hogy kísérlet történjen a fenntartható fejlődés indikátorainak megjelenítését az adott technológiánál. A költségelemzés rámutatott arra, hogy egy javítandó tengely javítása jelentősen olcsóbb, mint egy új tengely legyártása. Úgy ítélték meg, hogy az értékelemzés innovációs javaslatok kidolgozását tette lehetővé. A bemutatott javaslatok megvalósítása elősegítheti a vállalat hatékonyabb működését.

ÖSSZEFOGLALÁS

Magyarországon is folyamatosan be kell vezetni a fenntartható fejlődést keretrendszerét. A fenntartható fejlődés bevezetése igényli a hatékonyabb innovációs tevékenységet. Az innováció egyik leghatékonyabb eszköze az értékelemzés. Az értékelemzés alkalmazása egy gépipari technológia felülvizsgálatánál történt meg. A funkcióelemzés elősegítette, hogy a fenntartható fejlődés indikátorai megjelenítésre kerüljenek a technológia elemzésénél.

Ugyanakkor a funkció és költségelemzés elősegítette, hogy olyan javaslatokat kapjanak a vállalat vezetői, amelyek elősegítik az adott technológia fejlesztését.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] Ambrusné dr. Alady M. - dr. Árva J. - dr. Nagy P. S. - Dr. Pap A.: Gyártási eljárások, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2011., 110-118., 214-218. p.

[2] Bytheway, Charles W.: FAST Creativity & Innovation. (2007) J. ROSS PUBLISHING, USA. 372. pp.

[3] Clancy, D. F. – Dennis L. M.: The Innovation and Application of the Value – Based Design Charette – Start Your Project Right to Ensure a Successful Completion. SAVE International Conference, (2004) USA. 1-8. pp. CD.

[4] Kaufman, J. J. – Woodhead, R.: Stimulating Innovation in Products and Services with Function Analysis and Mapping. WILEY INTERSCIENCE, (2006) USA. 252. pp.

[5] Keszi-Szeremlei A. – Nádasi F.: Préségép excenter tengelyének csapácshelyei felújításának fejlesztése az értékelemzés módszerének alkalmazásával. Esettanulmány. Dunaújvárosi Egyetem, 2023.

[6] Nádasi F. – Tókécs N. – Bányai M. – Mészáros Á.: Évközi feladat a „Termékmenedzsment és értékelemzés” c. tantárgyból. Dunaújvárosi Egyetem, 2019. 1-22. old.

[7] Nádasi F. Szerk.: Az értékelemzés alapjai. Dunaújvárosi Főiskola Kiadó Hivatala, Dunaújváros. 2012. 142. pp.

[8] Nádasi F. – Zarádné Vámosi K.: Innovációs projektek kockázatának csökkentése a Value Methodology alkalmazásával. 25-34. pp. IV. IRI Társadalomtudományi Konferencia, 2016. április 24-25. Štúrovo, Szlovákia. INTERNATIONAL RESEARCH INSTITUTE s.r.o., Komárno, Szlovákia. Konferencia Kiadvány: Társadalom, kulturális háttér, gazdaság. Szerk.: Karlovitz János Tibor. 2016. International Research Institute, s.r.o., 1 – 488. pp. ISBN 978 – 80 – 89691 – 33 – 3

[9] Nádasi F. – Zarádné Vámosi K.: Innováció fejlesztése a Value Methodology (értékelemzés) módszercsalád alkalmazásával. Budapesti Kereskedelmi és Iparkamara, TANÁCSADÓK A KKV-K SZOLGÁLATÁBAN Konferencia, 2018. október 30. 13. pp.

[10] Nádasi F. – Keszi-Szeremlei A.: Értékelemzés – innováció – gazdasági növekedés. Globalizáció a 21. században. Dunaújvárosi Egyetem. Szerk.: Keszi-Szeremlei Andrea - Rajcsányi-Molnár Mónika. 2022. ISBN 978-615-6142-26-9. 9-22. pp.

[11] Pataki Béla: A technológia menedzselése. TYPOTEX. Budapest, 2005.

[12] Sato, Y. - Kaufman, J. J.: Value Analysis Tear – Down: A New Process for Product Development and Innovation. Industrial Press Inc. and Society of Manufacturing Engineers, New York, USA. 2005. 206. pp.

[13] SAVE: VM Guide. A Guide to the Value Methodology Body of Knowledge. A production of SAVE International. 2020. 188. pp.

[14] Stewart, R. B.: Fundamentals of Value Methodology. USA. 2005, 440. pp.

[15] Vámosi K. (Szerk.): Értékelemzési projektek. Medic-Tour 2002. Kft. Budapest. 2006, 209. pp.

Internetes források

[16] A fenntartható fejlődés indikátorai Magyarországon. /12 Felelős fogyasztás és termelés (SDG: Sustainable Development Goals).

www.ksh.hu/s/kiadvanyok/fenntarthato-fejlodes-indikatorai-2022/ffi., Letöltés dátuma: 2023. 07. 21.

[17] Az ATIX Plus Kft. hivatalos weboldala. <http://mobilhomokfuvas.com/korundos-tisztitas/>. Letöltés dátuma: 2023. 07. 22.

[18] A KASAMAS Hungária Hegesztés-technológiai Kft. hivatalos weboldala. <http://www.KASAMAS.hu/termek.php?mid=2&id=23>, Letöltés dátuma: 2023. 07. 22.

[19] WELDTECH Hegesztéstechnológiai Kft. hivatalos weboldala. <http://weldtech.hu/elektromos-femszoras/> Letöltés dátuma: 2023. 07. 22.

A cikk a VIII. Gépészeti Szakmakultúra Konferencián lett bemutatva.

A HIDEGPLAZMÁVAL VÉGZETT FELÜLETMÓDOSÍTÁS LEHETŐSÉGEI ADDITÍV TECHNOLOGIÁVAL GYÁRTOTT JÁRMŰIPARI ALKALMAZÁSOK ESETÉN

POSSIBILITIES OF COLD PLASMA SURFACE MODIFICATION FOR VEHICLE INDUSTRY APPLICATIONS MANUFACTURED WITH ADDITIVE TECHNOLOGIES

László Noémi, PhD hallgató, SEM Laborvezető, Dr. Ficzer Péter, egyetemi docens

ABSTRACT

Nowadays, additive technologies are widely used in the field of automotive production, thanks to the relative simplicity, flexibility and cost-effectiveness of the technology. This is especially true for parts made of plastic. Parts with FDM technology - after printing - often have an inadequate surface quality. The surface modification with cold plasma is one of the methods by which the surface roughness of the part can be influenced, and it can also contribute to improving the mechanical properties (e.g. wear and scratch resistance).

1. BEVEZETÉS

Manapság a polimer-alapú anyagokat [1] számos ipari területen sikeresen alkalmazzák, és egyre nagyobb hányadban válthatják ki a fém, - és kerámia anyagokat több ágazatban is, kezdve az elektronikától az élelmiszeriparon át, egészen az autó, -és repülőgépiparig [2-5].

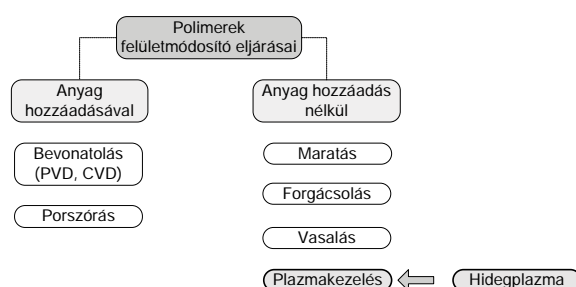
A nagy teljesítőképességű műszaki műanyagok autóipari alkalmazása folyamatosan növekszik, köszönhetően kedvező tulajdonságainak, így például kémiai inertségüknek, mechanikai tulajdonságaiknak, gazdaságos előállíthatóságának, valamint adalékokkal széleskörben történő módosíthatóságának is [6-8].

A polimerek felületi tulajdonságai gyakran nem felelnek meg a karcállósággal, nedvesíthetőséggel, adhéziós viselkedéssel, illetve súrlódással szemben támasztott elvárásoknak. Emiatt gyakran további felületkezelésekre van szükség a kívánt tulajdonságok eléréséhez, a térfogat jellemzőinek megőrzése mellett.

A felületkezelési módszerek egy lehetséges csoportosítását az 1. ábra szemlélteti.

A polimerek felületmódosításai alapvetően két csoportba sorolhatók: az anyag hozzáadásával, valamint az anyag eltávolításával járó eljárások. Az anyag hozzáadásával járó folyamatok a különféle bevonatolási eljárások (pl. PVD, CVD), amelyekkel a kopásállóság javítható, a porszórásos

eljárások, amellyel a porozitás és a felületi érdesség csökkenthető [9-11].

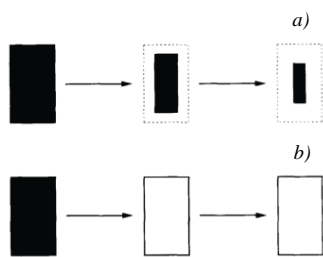


1. ábra. A felületmódosító eljárások csoportosítása, polimerek esetén [saját szerkesztésű ábra]

A felületi érdesség befolyásolása anyag hozzáadása nélkül is lehetséges. Ilyen kezelésnek tekinthető például a maratás. Ezen esetekben a maratás során alkalmazott maratószer többnyire olyan savakat és lúgokat jelent, amelyek magának a polimernek az oldószerei. Az additív megmunkálások során leggyakrabban alkalmazott politejsav (PLA) esetén ilyen maratószer lehet a NaOH: Schneider [12] kutatásai során rávilágított arra, hogy PLA nyomtatott alkatrészeken esetén, a marási idő növelése a felületi érdesség növekedését okozza. Ugyanakkor, az is megfigyelhető, hogy a nyomtatott anyag felületi érdessége kezdetben kisebb, átlagosan 4,5 nm, egy négy órás kezelést követően azonban ez mintegy 160 nm-re növekszik, köszönhetően az erózióknak.

A vonatkozó szakirodalmak szerint – polimerek esetén – felületi és tömbi erodálódó anyag típusok különböztethetők meg. Az egyes eróziós típusok közötti különbségeket a 2. ábra szemlélteti.

Felületi erózió esetén csupán a polimer felületéről történik anyagvesztés, egy adott alkalmazás során. Ez esetben méretcsökkenés figyelhető meg, ugyanakkor megtartják eredeti geometriai alakjukat. (Ezzel szemben a tömbi erodálódás során az erózió nem csupán a felületre korlátozódik.)



2. ábra. A tömbi és felületi erózió folyamatának sematikus ábrája a) felületi b) tömbi erózió [12]

A vasalás a nyomtatási eljárashoz köthető felületmódosítás. Az eljárás lényege, hogy nyomtatást követően, a legfelső rétegen a fúvóka – a nyomtatásnál alkalmazott hőmérsékleten áthalad, anyag hozzáadása nélkül vagy minimális anyag hozzáadásával, amelynek hatására a felületek jobban összeolvadnak, a réteg tömörebb, a hézagok kitöltése sokkal jobb lesz, miközben a felületi érdesség csökken [13].

Alzyod [14] kutatásai során a vasalási utómunkálás felületi érdességre gyakorolt hatását vizsgálta, PLA-ból, FDM technológiával előállított próbatesteken, különös tekintettel a vasalási paraméterek hatásainak vizsgálatára (vasalási sebesség, vasalási távolság és térfogatáram). A felületi érdesség meghatározását hagyományos, érintéses és optikai (érintkezésmentes) módszerekkel vizsgálta, valamint ezen vizsgálatok eredményeit hasonlította össze. Az eredmények azt mutatják, hogy a vasalási folyamat a felületi érdesség jelentős csökkenéséhez vezethet, továbbá, hogy a paraméterek optimalizálásával a felületi érdesség tovább csökkenthető.

A polimerek plazmával végzett felületkezelése sokrétű lehetőséget biztosít a polimer alkatrészek felületminőségének javításához, így például annak finomításához (a felületi érdesség csökkentésén keresztül).

A plazma az anyagok negyedik halmazállapotának tekinthető, elektromos töltéssel rendelkező részecskéket (pl. elektronok, fotonok, gyökök, -stb.) tartalmaz, makroszkopikusan semlegesnek tekinthető. Plazmakezelés segítségével széleskörben módosíthatók a polimerfelületek jellemzői, a kezelési paramétereinek (pl. gáz minősége, gázáramlás, teljesítmény, nyomás, kezelési idő, -stb.) szabályozásával. A gázösszetételtől és a plazmakörülményektől függően, ionok, elektronok, gyökök és VUV sugárzás is hatással vannak a kezelésben.

Azon plazmák, amelyek nem okoznak vékonyréteg-lerakódást, a felületen a következő hatásokat okozhatják [15]:

- 1) felülettisztítás, azaz szerves szennyeződések felületről történő eltávolítása;

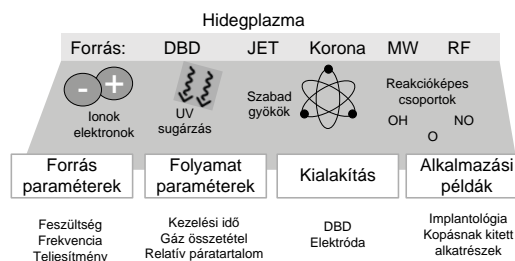
- 2) olyan anyag ablációja vagy maratása a felületről, amely a gyenge határreteg eltávolítását eredményezheti, a felület növelésével;
- 3) felületközeli molekulák térhálósodása vagy elágazások létrejötte, melyek kohéziósan képesek megerősíteni a felületi réteget;
- 4) a felület kémiai szerkezetének módosulása, amely akkor játszódik le, amikor a plazmakezelés hatására létrejövő szabad gyökök a légtér oxigénnel vagy vízgőzzel érintkezve reakcióba lépnek [16-17].

A polimerfelületek plazmakezelése nem csak a felület módosulását okozza a plazmaexpozíció során, hanem ún. aktív helyek is keletkeznek a felületeken, amelyek utóreakcióknak lehetnek kitéve. A jelenséget öregedésnek nevezik. Az öregedés mértéke függ a külső hatásoktól (pl. adszorpció vagy oxidáció), a termodinamikai egyensúlytól, valamint az átstrukturálódási és diffúziós folyamatoktól.

A vonatkozó szakirodalmak szerint többféle plazma létezik, azonban alapvetően két kategóriába, az egyensúlyi és a nem egyensúlyi plazmák közé sorolhatók, függően attól, hogy a termodinamika egyensúly áll-e fenn, illetve, hogy az elektronok hőmérséklete milyen az atomkéhez viszonyítva. Utóbbi a nem egyensúlyi plazmák jellemzője, a hidegplazma ebbe a kategóriába sorolható.

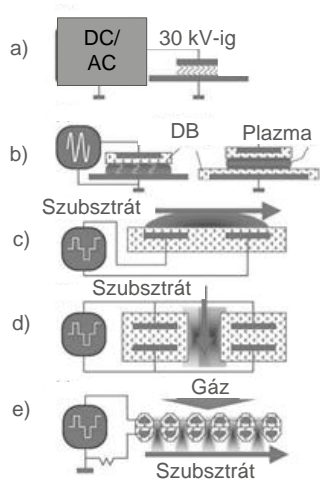
2. A HIDEGLAZMA

Polimerek felületmódosítására a hidegplazma a legalkalmasabb [18-19]. Ebben az esetben, az atomok szobahőmérsékletűek, míg az elektronok hőmérséklete ezt jóval meghaladja, akár egy nagyságrenddel is nagyobb hőmérsékletű lehet. A nagy elektronhőmérséklet egyben jelentős kémiai reaktivitást is eredményez, ezért jól alkalmazható tömbi anyagok, illetve akár additív megmunkálással előállított alkatrészek kezelésére is.



3. ábra. A hidegplazmakezelés folyamata és legfontosabb befolyásoló tényezői [saját szerkesztésű ábra]

A plazmaállapot létrehozására többféle plazmaforrás állhat rendelkezésre, így például koronakisülés vagy épp plazmasugár.



4. ábra. Koronakisülés és DBD plazmaforrások sematikus vázolata [20]

A technológiai költségek csökkentése a plazmakezelések fejlesztését a hidegplazma alkalmazásának irányába viszi. Számos olyan alkalmazás van, ahol az alacsony nyomású plazma nem helyettesíthető. Ennek ellenére, vannak olyan alkalmazások, ahol a nem-egyensúlyi hidegplazma alkalmazása atmoszférikus és nagyobb nyomáson jelentős előnyökkel jár.

3. A HIDEGLAZMÁS FELÜLETKEZELÉS LEHETSÉGES HATÁSAI

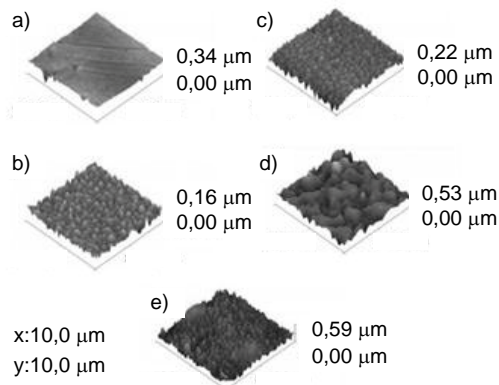
Károly és társai [21] kutatásaik során a hidegplazmakezelés tribológiai és adhéziós tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgálta PTFE és PA 66 anyagok esetén. A kezelés 24 és 800 h időtartamokban végezték. Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy ezen anyagok esetén a hidegplazma-kezelés a felületi összetételére hatással volt, a kezelés a felület oxidálódását eredményezte. A különféle anyagokon végzett tribológiai vizsgálatok rámutattak arra, hogy kis és közepes terhelés esetén a PA lényegesen nagyobb kopásállósággal rendelkezik, mint a PTFE.

A súrlódási együttható tekintetében megállapítható, hogy a kezelés ideje befolyásolja annak változását. Megfigyelhető, hogy 24 h plazmakezelés a súrlódási együttható csökkenését eredményezi, míg 800 h elteltével a súrlódási együttható növekszik.

Kostov [22] kutatásában tömegműanyagok esetén végzett hidegplazmakezelés hatásait vizsgálta. A PE, PP, és PET anyagokon végzett hidegplazma-kezelések (Ar gáz, 10 kV feszültség) a felületi morfológiára hatással vannak, a hatás a maratáshoz-hasonló. A felületi morfológiáról készült atomerómikroszkópos felvételeket az 5. ábra szemlélteti.

Mandolino [23] kutatásaiban a hidegplazma-kezelés polimer szubsztrát felületi érdességre gyakorolt hatását vizsgálta, különös

tekintettel a feszültségre, a kezelési időre, valamint a munkagázra. A PE és PP minták esetén elvégzett kezelések és vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a kezelés szignifikáns hatással van a felület nedvesíthetőségére, már rövidebb kezelési idő mellett is. Nagyobb energiaszint esetén kisebb nedvesítési peremszög érhető el.



5. ábra. AFM felvételek PP minták esetén: a) kezeletlen b) 30 s kezelés, c) 30 s kezelés+mosás, d) 60 s kezelés+mosás [23]

A legtöbb szakirodalom a felületi érdesség számszerűsítésére az R_a érdességi paramétert alkalmazza, amely nem veszi figyelembe a felület morfológiai jellemzőit, mivel a különböző alakú, de azonos számtani átlagos csúcsmagassággal és völgymélységgel rendelkező profilok ugyanazt az R_a értékeket mutatják. A felületi érdesség tekintetében az R_q érdességi paraméterrel jellemezhető legjobban az érdesség változása, mivel ezen paraméter sokkal érzékenyebb az érdességi csúcsok és a völgyek jelenlétére.

A Mandolino által elvégzett kutatások alapján megállapítható, hogy – PP esetén – a felület érdessége jelentősen megnőtt a kezelés hatására. A jelenség a kötések mechanikai tulajdonságainak megváltozásaival magyarázható.

Az érdesség változása azzal is magyarázható [22] ezen kezelés esetén, hogy a plazmagázban lévő gyökök ütköznek a legfelső rétegekben lévő polimerláncokkal, melyek így felhasadhatnak. A lánchasadás kis molekulatömegű oligomerek képződését eredményezheti, amelyeket el kell távolítani a felületről, amely így befolyásolja a felületi topográfia változásait. Ez az ún. anyag eltávolítási folyamat egy, a maratáshoz hasonló hatást eredményez, amely felelős a felületi érdesség változásáért.

Hegemann [16] kutatásai során a plazmakezelések adhézióra és felületi karakterisztikára gyakorolt hatásait vizsgálta PC és EPDM anyagok esetén. Kutatásában a reakciógázok (He és Ar) hatását elemezte, a súrlódási együttható esetén. Hegemann a kutatásában a súrlódási együtthatót atomi, mikro,-

és makroszkopikus szinten is tárgyalta. Ennek megfelelően:

- az atomi szinten értelmezett sűrűlési együttható disszipatív mechanizmusokon alapul, és atomok egymáson történő elcsúszásaként definiálható;
- mikroszkopikus szinten a sűrűlés két egymással kölcsönhatásban lévő felület relatív elmozdulását jelenti;
- makroszkopikus szinten a sűrűlési tényező a sűrűlési erő és a terhelőerő hányadosa.

Az elvégzett vizsgálatok során a különféle polimerek sűrűlési együtthatója, adott vizsgálati körülmények között (kezelési paraméterek – 20 perc kezelési idő, 300 W teljesítmény és 0,2 mbar nyomás) a sűrűlési együttható csökkenését eredményezte. A kezelési idő növelése a sűrűlési tényező további csökkenését okozta. Ugyanakkor, a plazmakezelést 1 hónappal később elvégezve, már nem okozott szignifikáns csökkenést a sűrűlési tényező tekintetében.

Zhang [24] kutatásai során PEEK, PEEK+8% PTFE, valamint PEEK+10% PTFE+10% karbonszál anyagokat plazmakezelt, a tribológiai tulajdonságok jellemzése céljából. A kezeléseket Ar gázban végezték, a kezelési paraméterek szabályozásával (kezelési idő: 1-5 perc, feszültség: 0,8-1,3 kV). A tribológiai vizsgálatok acélgyűrű ellentesttel kerültek elvégzésre. Az elvégzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a csúszó-sűrűlési együttható és a fajlagos kopási tényező értékek jelentősen csökkentek, különösen a PEEK-acélgyűrű tribológiai pár esetén. Az átlagos sűrűlési együttható érték 0,42-ről 0,23-ra csökkent. Ugyanakkor, a plazmakezeléseken átesett próbatestek esetén más kopási mechanizmus játszódtott le, mint a kezeletlen minták esetén.

A kutatás ugyanakkor rámutat arra, hogy a plazmakezelés hatással lehet a polimer kristályossági fokára is, amely a szilárdság és a keménység növekedését eredményezheti. Ez többek között a kristályos fázisban lévő intermolekuláris kötőerők jelenlétével magyarázható, amelyek orientált láncok kialakulásához vezet [25].

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen kutatás célja a polimer alkatrészek felületminőségének javítását segítő felületkezelő, - és módosító eljárások áttekintése, különös tekintettel a hidegplazma segítségével végezhető felületmódosításokra.

A plazmakezelés az utóbbi időben egyre nagyobb teret hódító felületmódosító eljárás, amelyet kezdetben leginkább az orvostechonikai célokra fejlesztett polimerimplantátumok esetén alkalmaztak, a polimerfelület

nedvesítőképességének javítása céljából, mára azonban ipari alkalmazásokban is egyre jobban elterjedt eljárásnak tekinthető, a sűrűlés, - illetve felületi érdesség csökkentő hatásainak köszönhetően. Az elvégzett kutatómunka alapján a következő megállapítások tehetők:

- a különféle plazmakezelések alapvetően négyféle hatást, (felülettisztítás, maratás, térhálósodás, felület-kémiai tulajdonságok változása) eredményezhetnek a polimerek felületén, ezen hatások mindegyike jelentkezik a kezelés eredményeként, azonban ezek mértéke alapvetően a kezelési paraméterektől függ;
- A vonatkozó szakirodalmak alapján polimerek kezelésére leginkább a hidegplazma felel meg, amely műanyagok esetén elsősorban a maratáshoz hasonló mechanizmus szerint a felületi érdesség csökkenését eredményezi;
- A felületi érdességet a legtöbb szakirodalom az Ra átlagos felületi érdességi paraméterrel jellemzi, azonban ezen paraméter nem veszi figyelembe a felületi morfológiát. Ebből adódóan célszerű lehet a felületi érdességet további 2D, így például az Rp (maximális profilcsúcs-magasság) vagy Rmr (relatív anyaghányad) vagy 3D érdességi paraméterrel jellemezni. Ugyanakkor, érdemes megjegyezni, hogy a 3D nyomtatás esetén a felületi érdesség irányfüggő, amely szintén indokolja a 3D érdességi paraméterek (pl. S_a) használatát
- A jelen kutatás keretein belül bemutatott cikkek alapján megállapítható, hogy a hidegplazmával végzett kezelésekkal a polimerek felületi érdessége csökkenthető, továbbá a tribológiai teljesítőképességet is előnyösen befolyásolhatja. Ezen tulajdonságaiból adódóan, a hidegplazmával végzett kezelés megfelelő eljárás lehet a polimerek felületmódosítására, különösképpen, a viszonylag rossz és mindemellett változó felületi érdességet eredményező additív technológiák esetén.

IRODALOM

- [1] Kmetz, B., Takács, Á.: Demand for recycling filament in 3D printing, Design of Machines and Structures, 2020, 10, 2, p.65-72.
- [2] Tuazon, B., Custodio, A.V., et. al.: 3D Printing Technology and Materials for Automotive Application: A Mini-Review, Key Engineering Materials, vol.913, 2022, p.3-16.
- [3] Lim, C.W., Le, K.Q., Lu, Q., Wong, C.H.: An overview of 3-D printing in the manufacturing, aerospace, and automotive industries, Smart Manufacturing, 2016, p.18-22.

- [4] Elakkad, A.S.: 3D Technology in the automotive industry, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol.8., Issue 11, 2019. p. 248-251, ISSN: 2278-0181
- [5] Raheem, D.: Application of plastics and paper as food packaging materials - An overview, *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2012, 25,3,, p. 177-188, <https://doi.org/10.9755/ejfa.v25i3.11509>
- [6] Patil A., Patel, A., Purohit, R.: An overview of Polymeric Materials for Automotive Applications, *Materialstoday: Proceedings*, vol.4., Issue 2, 2017, p.3807-3815, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.278>
- [7] Kim, D., Lim, J., et. al.: Thermal and mechanical properties of polymeric materials for automotive applications using molecular dynamics simulation, *Materialstoday: Communication*, 36, 2023, p. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106529>
- [8] Sadiku, R., Ibrahim, D., et. al.: Automotive components composed of polyolefins, *Polyolefin Fibres (Second Edition), Structure, Properties and Industrial Applications*, The Textile Institute Book Series, 2007, p.449-496. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101132-4.00015-1>
- [9] Zlamal, T., Mrkvica, I., et. al.: The Influence of Surface Treatment of PVD Coating on Its Quality and Wear Resistant, *Coatings*, vol 9(7), 439, p.1-12, <https://doi.org/10.3390/coatings9070439>
- [10] Heinze, M., Menning, G., Paller, G.: Wear resistance of PVD coatings in plastics processing, *Surface and Coatings Technology*, vol. 74-75, Part 2., 1995, p. 658-663, [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)08352-9](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)08352-9)
- [11] Medel, F.J., Martinez-Nogues, et. al.: Tribological performance of DLC coatings on UHMWPE, *Surface Modifications and Functionalization of Materials for Biomedical Applications*, *Journal of Physics: Conference Series*, 252, 2010, p. 1-9, [doi:10.1088/1742-6596/252/1/012006](https://doi.org/10.1088/1742-6596/252/1/012006)
- [12] Schneider, M., Fritsche, N., et. al.: Surface Etching of 3D Printed Poly(lactic acid) with NaOH: A Systematic Approach, *Polymers*, vol 12, Issue 8, 2020, p. 1-16. <https://doi.org/10.3390/polym12081711>
- [13] Ficzer, P.: A vasalási eljárás paraméter-változásának hatása a felületi érdességre FFF-eljárással készített additív gyártás esetén, *Országos Additív Ipari Tudományos Konferencia és Workshop*, szakmai előadás, Neumann János Egyetem, Kecskemét, 2023. szeptember 15.
- [14] Alzoyd, H., Ficzer, P., Takács, J.: Improving surface smoothness in FDM parts through ironing post-processing, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2023, <https://doi.org/10.1177/0731684423117305>
- [15] Liston, E.M., Martinu, L., Wertheimer, M.R.: Plasma surface modification of polymers for improved adhesion: a critical review, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 7, 10, 1993, p. 1091-1127, <https://doi.org/10.1163/156856193X00600>
- [16] Hegemann, D., Brunner, H., Oehr, C.: Plasma treatment of polymers for surface and adhesion improvement, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 208, 2003, p. 281-286, [doi:10.1016/S0168-583X\(03\)00644-X](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)00644-X)
- [17] Mandolino, C., Lertora, E., Gambaro, C.: Influence of cold plasma treatment parameters on the mechanical properties of polyamide homogeneous bonded joints, *Surface and Coatings Technology*, 323, 2017, p. 222-229., <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.071>
- [18] Károly, Z., Klébert, Sz., Kalácska, G.: Hidegplazmák alkalmazása polimerek felületmódosítására, *Polimerek*, I. évf., 5., 2015, p.147-152.
- [19] Berczeli, M., Hatoss, B., Kókai, E.: Surface treatment of polymer matrix nanocomposites for adhesion enhancement by cold plasma, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2022, 1246, p.1-9, [doi:10.1088/1757-899X/1246/1/012028](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1246/1/012028)
- [20] Al Maliki, H.: Adhesive and tribological behaviour of cold atmospheric plasma-treated polymer surfaces, PhD értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő, 2018, p.15-20
- [21] Karoly, Z., Kalácska, G., et. al.: Effect of Atmospheric Cold Plasma Treatment on the Adhesion and Tribological Properties of Polyamide 66 and Poly(Tetrafluoroethylene), *Materials*, 12, 658, 2019, p.1-14.
- [22] Kostov, K.G., Nishime, T.M.C., et. al.: Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet, *Applied Surface Science*, 2014, p.367-375.
- [23] Mandolino, C., Lertora, E., Gambaro, C.: Effect of Cold Plasma Treatment on Surface Roughness and Bonding Strength of Polymeric Substrates, *Key Engineering Materials*, vol.611-612, 2014, p.1483-1493, [doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1484](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1484)
- [24] Zhang, R., Friedrich, K., et. al.: Study on tribological behaviour of plasma-treated PEEK and its composites, *Wear*, Part 2, 1995, p. 613-623
- [25] Chapter A1 - Physical, thermal, and mechanical properties of polymers, p. 329-344., <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118950623.app1>

GÉPJÁRMŰ MEGHIBÁSODÁSOK VIZSGÁLATI LEHETŐSÉGE A TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA) MÓDSZERREL

POSSIBILITY OF INVESTIGATING VEHICLE FAILURES WITH THE TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA) METHOD

*Kriston J. Balázs, PhD hallgató, Dr. Jálics Károly PhD, egyetemi docens
Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet*

ÖSSZEFOGLALÁS (ABSTRACT).

In this paper the method of the Time Difference of Arrival (TDOA) method will be tested for the failure signal localization on vehicle structures. Relevant literature of the diagnostics does not handle the TDOA method for vehicle diagnostic purposes, so it is a novel application field of this method. Based on own measurements on a vehicle structure (Ford Focus body) the effectiveness of the method and the drawbacks, advantages will be presented.

1. BEVEZETÉS

Az autógyártás bonyolult világában a könnyed és kényelmes utazás biztosítása a legfontosabb. A jármű vibrációi, bár gyakran finomak, számos olyan mögöttes problémát jelezhetnek, amelyek mind a vezető kényelmét, mind pedig a jármű általános teljesítményét és biztonságát befolyásolják.

Ahogy a járművek technológiailag egyre fejlettebbek lettek, úgy fejlődtek a rezgések diagnosztizálására és csökkentésére szolgáló módszerek is. A jármű rezgésdiagnosztika, amely a modern gépjármű-karbantartás kulcsfontosságú aspektusa, magában foglalja a járművön belüli rezgésforrások azonosítását és az abnormális rezgések okainak szisztematikus elemzését. Gépek és berendezések rezgés- és zajdiagnosztikájával számos szakirodalom foglalkozik, viszont gépjárművekkel kapcsolatban hasonló publikációkkal alig találkozhatunk. Ezzel a témával foglalkozik pl. az [1.], [2.] és [3.] irodalom. Ennek az az oka, hogy egy üzemelő gépjármű esetén számos zaj és rezgésjelenség van jelen a motor működéséből, az úttesttől származó gerjesztéstől, az áramló levegő általi gerjesztésből, amelyek elfedhetik egymást, kiolthatják egymást stb. Egyszóval rendkívül nehézé teszik egyes hibajelenségek azonosítását a klasszikus zaj- és rezgésdiagnosztikai eszközökkel. Jelen publikációban egy olyan módszert kívánunk bemutatni, amely gépjárműveken történő alkalmazásával kapcsolatos források még nem állnak rendelkezésre. A módszer célja a gépjármű keletkező hiba helyzetének meghatározása, legalábbis hozzávetőleges pontossággal a

gépjárműhöz kötött derékszögű koordináta rendszerben.

2. A LOKALIZÁCIÓS MÓDSZER RÖVID BEMUTATÁSA

Az általunk vizsgálni kívánt módszer a hibajelek beérkezési különbségéből (Time Delay of Arrival: TDOA) határozza meg egy matematikai algoritmus segítségével a hiba helyzetét.

A módszer nem új, régóta használják különböző változatait a tudomány és technika számos területén. említést érdemel a szeizmológia, ahol a földrengések epicentrumának meghatározása történik ilyen módszerrel, a GPS alapú navigáció, anyagok akusztikus emissziós vizsgálata, katonai alkalmazások, mint pl. a fegyverdörrenés helyzetének meghatározása. Ezekkel kapcsolatban számos szakirodalom foglalkozik a módszerrel és felhasználásával ezeken a területeken. Sok területen viszonylag egyszerű a problémafelvetés, hiszen pl. a GPS jelek esetén a terjedést normál esetben nem korlátozza semmi a jeladó (műhold) és a vevő között, hullámterjedés szempontjából homogén közeggel dolgozunk.

Az akusztikus emissziós vizsgálat ettől már összetettebb alkalmazás, mivel a hullámterjedés szilárd közegben megy végbe, ill. a vizsgált objektumok (alkatrészek részegységek) geometriai felépítése bonyolultabb lehet. A módszer felhasználásával gépjárművek esetén azzal a problémával találjuk szembe magunkat, hogy a gépjármű karosszériája bonyolult felépítésű, a homogén hullámterjedést nem teszi lehetővé. Célunk tehát a módszer használhatóságának vizsgálata gépjárműkarosszériák esetén.

3. A LOKALIZÁCIÓS MÓDSZER ELVÉNEK BEMUTATÁSA

Az érkezési időkülönbség módszer (TDOA) kétlépcsős algoritmuson alapul. Első lépésben az egyes források relatív időkésltetését határozzuk meg a kapott adatok alapján. Ezeket az időkésléseket azután hiperbolikus görbék generálására használjuk, amelyek a jelforrás helyzeténél metszik egymást.

A kétlépcsős folyamat, bár csökkenti a helymeghatározás bonyolultságát, viszont bizonyos esetekben nem működik optimálisan. Pl. a módszer kevésbé hatékony többforrású problémáknál, mivel az algoritmusok egy forrású modellt feltételeznek. A módszer tesztelésénél ezt úgy fogjuk elkerülni, hogy ténylegesen csak egyszeres hibajelforrásokat alkalmazunk.

A lokalizációs módszer mátrixokat használ a forrás helyzetének meghatározására a forrás és a vevők közötti késleltetések alapján. Ez a lokalizációs módszer a referencia vevő fogalmát használja úgy, hogy az időkésleltetéseket össze lehessen hasonlítani egymással.

Az alábbiak bemutatom az algoritmust, a részletes levezetést mellőzve, amely megtalálható a vonatkozó szakirodalomban, pl. [5.] -ban. Ez alapján tehát legyen a forrás az ismeretlen helyen (x, y) , az N db szenzor pedig az ismert koordinátákon (x_i, y_i) $i = 1$ -től N -ig. A forrás és az i . vevő közötti négyzetes távolságot a következőképpen adjuk meg:

$$\begin{aligned} r_i^2 &= (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 \\ &= x^2 + y^2 - 2x_ix + \\ &\quad - 2y_iy + x_i^2 + y_i^2 \end{aligned} \quad (1)$$

ahol legyen $x_i^2 + y_i^2 = K_i$.

További átalakításokat végezve ill. bevezetve, hogy $d_{i,1}$ az érkezési időkülönbség az i . érzékelő és az 1. érzékelő (a referenciavevő) között, c a jel terjedési sebessége és $r_{i,1}$ a TDOA távolság, ezzel:

$$r_i^2 = cd_{i,1} = r_i - r_1 \quad (2)$$

További átalakításokat végezve a következő mátrix egyenletet kapjuk:

$$2X \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = 2Ar_1 + B \quad (3)$$

ahol

$$\begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} \\ \vdots & \vdots \\ x_{N,1} & y_{N,1} \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} r_{2,1} \\ r_{3,1} \\ \vdots \\ r_{N,1} \end{bmatrix} \text{ és} \\ B &= \begin{bmatrix} r_{2,1}^2 \\ r_{3,1}^2 \\ \vdots \\ r_{N,1}^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

Átalakítva a 3. egyenletet mindkét oldal X^T -vel történő szorzásával, 2 -vel történő osztásával, majd az eredmény mindkét oldalának $X^T X$ -el történő szorzásával a következő alakot kapjuk:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = Cr_1 + D \quad (5)$$

Jegyezzük meg, hogy a fenti egyenlet csak akkor oldható meg, ha létezik $X^T X$ inverze. Ez megköveteli, hogy X -nek egynél több sora legyen (ami három vagy több vevőnek felel meg), az X sorainak pedig lineárisan függetleneknek kell lenniük (ami azt jelenti, hogy a vevők nem kollineárisak). Az 5. egyenlet C és D paraméterei az 6. egyenlet szerinti alakot öltik.

$$\begin{aligned} C &= (X^T X)^{-1} X^T \begin{bmatrix} -r_{2,1} \\ -r_{3,1} \\ \vdots \\ -r_{N,1} \end{bmatrix}; \\ D &= (X^T X)^{-1} X^T \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -r_{2,1}^2 + K_2 - K_1 \\ -r_{3,1}^2 + K_3 - K_1 \\ \vdots \\ -r_{N,1}^2 + K_N - K_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

Az 5. egyenletet tovább alakítva az alábbi alakot kapjuk:

$$ar_1^2 + \beta r_1 + \chi = 0 \quad (7)$$

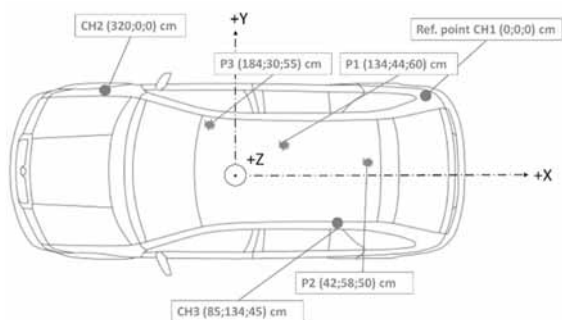
Megoldva az 7. másodfokú egyenletet r_1 -et kapjuk, amelyeket azután (5.) -be behelyettesítve (x, y) közelítő értékét kapjuk.

Az előbb bemutatott algoritmus egyszerűen programozható pl. Matlab kompatibilis GNU/Octave magasszintű programozási nyelvvel. A program elkészült, a $c = 3000$ m/s a karosszéria anyagában terjedő hajlítási hullám terjedési sebességének feltételezésével. Ez az érték acéllemezekre jellemző érték. A cikkben bemutatott helymeghatározási eredmények az GNU/Octave programmal készített kód segítségével számítottuk ki. A módszerre a továbbiakban SX módszerként hivatkozunk, amely az angol „spherical intersection” kifejezésből képzett rövidítés.

4. A MÉRÉS BEMUTATÁSA

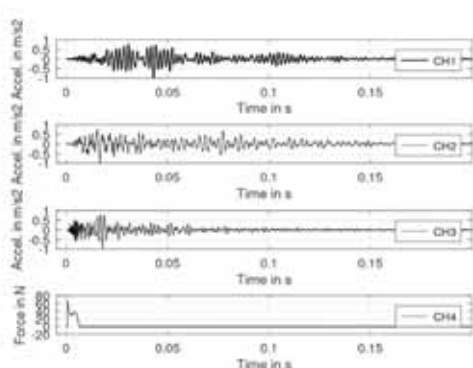
Az SX módszer legalább három érzékelőből álló tömböt használ, amelyek közül az egyiket referencia érzékelőnek választjuk. Jelen esetben legyen az 1. számú érzékelő a referencia érzékelő.

Az érzékelőket a karosszéria felületén helyezük el mágneses csatlakoztatás segítségével, az 1. ábra szerint. Az érzékelők egytengelyű B&K 4382 típusú gyorsulásérzékelők (az ábrán CH1...CH3 jelöléssel), amelyek jeleit egy B&K Photon+ mérési adatgyűjtővel rögzítjük.



1. ábra. A mérési elrendezés a gépjármű karosszériáján

A mérések során tehát karosszériát a P1...P3 pontokon megütjük az impulzus kalapáccsal (PCB 086C02) és mérjük a kalapács, valamint a gyorsulásérzékelőkbe érkező jeleket (2. ábra), mintegy szimulálva egy hibajenéséget.

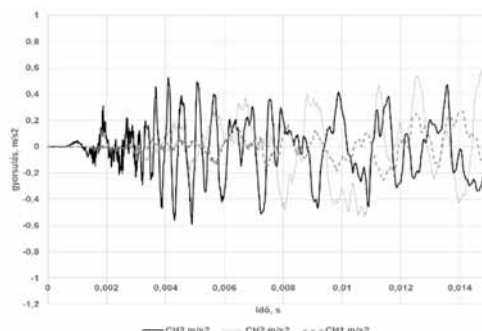


2. ábra. A mért időjelek CH1, CH2, CH3 és CH4 esetén a P1 pontban gerjesztve impulzuskalapáccsal (CH4)

Az impulzus kalapács jelét is rögzítjük, bár az algoritmusnak erre nincs szüksége. A kalapács jelének ismerete azonban segíthet az algoritmus működésének ellenőrzésekor, amikor is az időkülönbségek bevitelére kerül sor. A kalapács jelének, mintegy kezdő/trigger jel ismeretében ugyanis az egyes gyorsulásérzékelők közti időkülönbségek könnyebben meghatározhatók, mivel pontosan ismerjük, mikor keletkezett a hibajel. Ezt azonban csak az algoritmussal számított időkésleltetések ellenőrzésére használtuk.

A 3. ábrából jól látható, hogy CH3 jelszintje emelkedik a legkorábban, ezt követi CH2, majd CH1. Ez azt jelenti, hogy a gerjesztés helyétől CH3 van a legtávolabb és CH1 a legközelebb. Az 1. ábrán feltüntetett koordináták alapján elmondhatjuk, hogy CH3 valóban a legközelebb van (1,02 m), ezt követi CH1 (1,41 m) és végül CH2 (1,92 m). A feladat tehát a három jel beérkezési időkülönbségének magállapítása számítással. Ehhez a további jelfeldolgozás során

CH2 és CH1, valamint CH3 és CH1 között előállítjuk a keresztkorrelációs függvényt és ezekből számoljuk az időeltolódást.

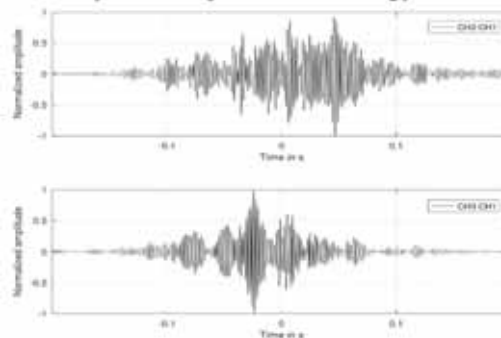


3. ábra. A mért időjelek CH1, CH2, CH3 és CH4 esetén a P1 pontban gerjesztve impulzuskalapáccsal (CH4)

5. A JELFELDOLGOZÁS ÉS A MÉRÉSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

A jelfeldolgozás során az $R_{xy}(m)$ keresztkorrelációs függvényt használjuk két egymástól különböző $x(t)$ és $y(t)$ jel korrelációjának leírására a két jel közötti τ különböző időeltolásoknál. A művelet két jel közötti hasonlóságról ad információt, megmutatja, hogy az egyik jelben milyen mértékben található meg a másik. A keresztkorrelációs függvény mért jelekből történő előállítására ismét egy a GNU/Octave -ban írt programkódot hívtuk segítségül, ahol az „xcorr” utasítás segítségével végezhető a számítás. A keresztkorrelációs függvények számításának eredményeit a 3. ábrán láthatjuk.

A két jel időeltolódását végeredményben a keresztkorrelációs függvény maximumhelyének x koordinátájának megkeresésével kapjuk.



4. ábra. A számított keresztkorrelációs függvények CH1 és CH2, valamint CH1 és CH3 között a P1 pontban történő gerjesztés esetén

A művelet ellenőrzéséhez az időeltolás számítását az FFT algoritmus segítségével is elvégezzük. Ehhez CH1, CH2 és CH3 jeleket transzformáljuk a frekvencia tartományba majd

CH1 komplex spektrumát megszorozzuk CH2 komplex konjugált spektrumával, amivel előállítjuk az ún. keresztjeljesítmény spektrumot. Ezután elvégezzük ezen az inverz FFT transzformációt, amivel a CH2 és CH1 vonatkozásában megkapjuk a keresztkorrelációs időfüggvényt. Ezeket a műveleteket elvégezzük CH1 és CH3 vonatkozásában is. A műveleteket itt is GNU/Octave segítségével végezzük el. Az időeltolódások vonatkozásában a már említett „xcorr” függvénnyel és az FFT/invFFT műveletekkel számított időeltolódások egymással megegyeznek, tehát egyenértékűek egymással (1. táblázat). Az időeltolódások a TD21 és TD31 paraméterrel jelöltük, ahol a TD az angol „Time Delay” rövidítése.

1. táblázat. A két módszerrel számított időkülönbségek

	TD ₂₁ [s]	TD ₃₁ [s]
xcorr	0.0466	0.0250
FFT/iFFT	0.0476	0.0239

Megjegyzendő, hogy a modern zaj és rezgésmérő szoftverekben beállítható, hogy már a mérés során a kiválasztott csatornák közti keresztjeljesítményspektrum is rögzítésre kerüljön, amelyen inverz FFT műveletet végrehajtva megkapjuk a keresett keresztkorrelációs függvényt.

6. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE ÉS A MÓDSZER TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEI

Az előző fejezetben leírt időkések értékei már csak a 3. fejezetben leírt algoritmusba behelyettesítve a GNU/Octave program kiszámolja a keresett hiba koordinátáit. Vizsgáljuk először azonban az időkések elméleti értékeit is. Lemezserű alkatrészekben, mint a karosszériaelemek jelentős része is, elsősorban hajlító hullámok terjednek. A hajlító hullámok terjedési sebessége a rugalmassági modulustól, a Poisson-számtól és az anyag sűrűségétől függ. Acél anyagra ezek figyelembevételével a terjedési sebességre $c_{hj} = 3200 \text{ m/s}$ adódik. Az érzékelők ismert geometriai koordinátáikból egyszerűen ($t = s/v$) kiszámíthatjuk a beérkezési időkülönbségeket, amelyek $TD_{elm21} = 0,000159 \text{ s}$, és $TD_{elm31} = 0,0001218 \text{ s}$ -ra adódnak. Az 1. táblázat értékeivel összehasonlítva láthatjuk, hogy a mérésből számított értékek 2 nagyságrenddel nagyobbak az elméleti értékektől. Elvégezve a helymeghatározási számításokat az eredmények száz m nagyságrendbe esnek, amelyek túl nagyok a karosszéria *max.* 4,5 m hosszához képest. A bemutatott módszer célja a hibák

helymeghatározása, azonban a jelenleg közreadott eredmények alapján a helymeghatározás hibája még túl nagy. Az eltérés oka sokrétű lehet. Először is vizsgálni kell a hullámterjedési sebesség változását terjedés közben, mivel a közeg nem homogén, abban az impedancia változik. Másodsorban a mérés kori mintavételezési frekvencia elégtelensége lehet az ok. A méréshez egy általános rendeltetésű NVH mérési adatgyűjtőt használtunk (B&K Photon+), amelyben beállítható mintavételezési frekvenciát használtuk, azaz 65 kHz -et. Más adatgyűjtőt alkalmazva, pl. NI 9775, akár már 20MHz mintavételezési frekvenciát is használhatunk. A következő lépésben tehát ezen adatgyűjtő alkalmazását fogjuk vizsgálni, hogy mennyiben befolyásolja a helymeghatározás pontosságát a mintavételezési frekvencia növelése. A harmadik, és egyben legígéretesebb vizsgálati lehetőség a hajlító hullámok terjedési sebességének diszperzítésének figyelembe vétele. A jövőbeli munka célja ennek a hibának a csökkentése, eliminálása. Ennek sikere esetén olyan módszer fog rendelkezésre állni, amelyre nincs létező példa. Ez adja majd a munka újszerűségét.

7. IRODALOM

- [1] Kriston, B.J., Jálics, K.: Malfunction or Normal Operation? Evaluation of the Subjectivity of Noise and Vibration Phenomena Accompanying the Operation of Motor Vehicles, LECTURE NOTES IN MECHANICAL ENGINEERING Vehicle and Automotive Engineering 4 pp. 848-860., 13 p. (2022)
- [2] Kriston, B.J., Jálics, K.: Application of vibro-acoustic methods in failure diagnostics, JOURNAL OF PHYSICS-CONFERENCE SERIES 1935, 1 p. 012002, 22 p. (2021)
- [3] Szabó, J.Z., Dömötör, F.: Comparative Testing of Vibrations in Vehicles Driven by Electric Motor and Internal Combustion Engine (ICE). In: Jármái, K., Cservenák, Á. (eds) Vehicle and Automotive Engineering 4. VAE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_72
- [4] Schau, H., Robinson, A.: Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 35, no. 8, pp. 1223-1225, 1987, doi: 10.1109/TASSP.1987.1165266.
- [5] Zong Thai, D. et al: A.: Speaker Localisation Using Time Difference of Arrival, School of Electrical and Electronic Engineering, The University of Adelaide, DSTO-TR-2126, 2008

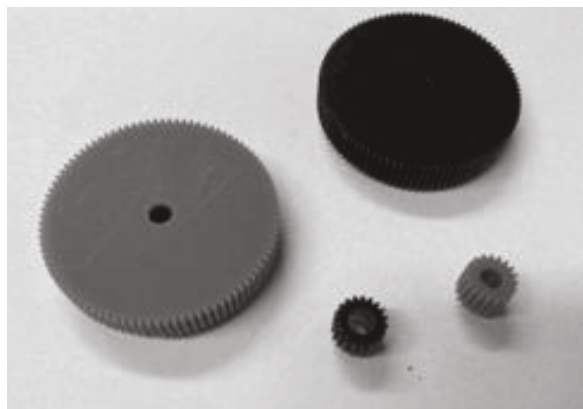
A KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKERÉKPÁROK ÁTFORGATÁSI NYOMATÉKÁNAK VIZSGÁLATÁRA SZOLGÁLÓ BERENDEZÉSEK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA

COMPARISON OF THE EQUIPMENTS FOR THE MEASUREMENT OF THE RECIRCULATION TORQUE IN THE CASE OF SMALL PLASTIC GEARS

*Marada Imre, PhD hallgató, Dr. Bihari János, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gép – és
Terméktervezési Intézet*

ABSTRACT

For the study of the gear drives it is a frequent method to measure the recirculation torque on the input side of the gearbox. We showed several times in the past, that this method can be also used for gearboxes with small plastic gears. During our work we created two equipments for the measurement of the recirculation torque. One with a static torque meter and another which can be used to measure the torque dynamically. In this article we compare these equipments.



1. ábra: Kisméretű műanyag fogaskerekek

1. BEVEZETÉS

A fogaskerekes hajtóművek vizsgálatára gyakran alkalmazzák a hajtómű behajtó oldalán az átforgatási nyomaték mérését, különösen kúpkeres hajtóművek esetén. Korábban már több alkalommal is kimutattuk, hogy ez a módszer a kisméretű műanyag fogaskerekek hibáinak vizsgálatára is alkalmas lehet.

A kisméretű műanyag fogaskerekek olyan evolvens profilú, egyenes fogú fogaskerekek, melyeknek modulja nem nagyobb 0,5 mm-nél. Ezeknek a fogaskerekeknek az alapanyaga valamilyen műanyag, általában POM vagy PA. [1] [2]

Korábbi munkáink során már bemutattunk egy olyan berendezést, amely statikus nyomatékmérő tengely segítségével képes volt a kisméretű műanyag fogaskerekek hibáinak vizsgálatára. Azóta sikerült létrehozunk egy olyan berendezést is, melynek segítségével dinamikus nyomatékmérést tudunk végrehajtani. Ez a cikk ezt a két berendezést mutatja be, illetve hasonlítja össze. Az összehasonlítás során érinteni fogjuk a berendezések előnyeit és hátrányait.

2. A BERENDEZÉSEK TERVEZÉSÉNEK SZEMPONTJAI

A berendezések tervezésének legfontosabb szempontja természetesen az volt, hogy alkalmasak legyenek a hajtómű behajtó oldalán az átforgatási nyomaték mérésére, illetve, hogy a mérések segítségével lehessen vizsgálni a fogaskerekek hibáinak hatásait.

További fontos szempont volt még az is, hogy a vizsgálatokat ne csak egy lépcsős, de több, akár négy lépcsős hajtásokkal is el lehessen végezni.

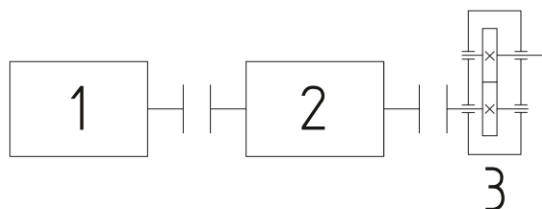
Ezeket felül pedig arra is oda kellett figyelni, hogy ezeket a berendezéseket a rendelkezésünkre álló eszközökből, forrásokból és technológiákkal le is tudjuk gyártani és meg is tudjuk építeni, hogy ne csak elméletben létezzenek, hanem tényleges kézzelfogható méréseket is el tudjunk velük végezni.

3. AZ ÁTFORGATÁSI NYOMATÉK MÉRÉSÉNEK ALAPELVE

A mérés alapelve általános esetben igazán egyszerű: a hajtómű bemenő tengelyét forgatják, miközben a hajtóművön nincs terhelés. Eközben a hajtómű bemenő oldalán mérik az átforgatáshoz szükséges nyomatékokat. A mért nyomatékból lehet

következtetéseket levonni a fogaskerék hibáival kapcsolatban. [3]

A mérés alapelvét a 2. ábra mutatja. Az ábra jelöléseinek jelentése: 1: meghajtó motor, 2: nyomatókmérő, 3: hajtómű.



2. ábra: Az átforgatási nyomaték mérésének alapelve

A berendezések tervezésénél ebből az alapelvből indultunk ki, majd ezt módosítottuk a rendelkezésünkre álló eszközökhöz és technológiákhoz.

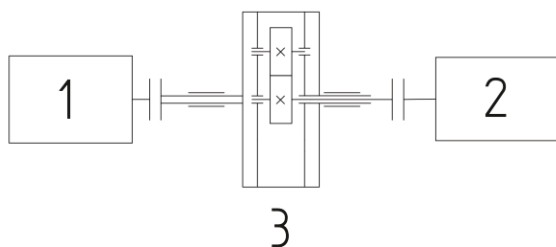
4. AZ ELSŐ BERENDEZÉS

Az első berendezés építéséhez egy PCE TM-80 statikus nyomatékmérő állt rendelkezésünkre. A statikus nyomatékmérő tengelyek nagy előnye a kereskedelmi forgalomban elérhető dinamikus nyomatékmérőkhöz képest, hogy olcsóbbak.

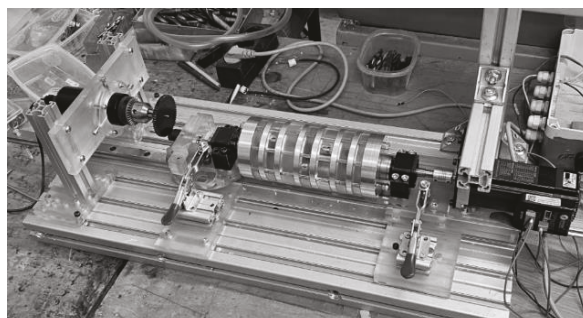
A mérés is másként működik, mint dinamikus nyomatékmérők alkalmazása esetén, ugyanis nem a hajtómű bemenő tengelyét forgatjuk, hanem a teljes hajtóművet. A hajtómű bemenő tengelye a mérés során áll, ehhez kapcsolódik a statikus nyomatékmérő tengely.

A hajtóművet egy motor forgatja. A hajtómű mindkét oldalon csapágyazva van. A csapágyazásokat egy-egy lineáris vezetékre szereltük fel, hogy a hajtómű beépítésekor könnyen távolíthatóak és közelíthetőek legyenek. Ez egyrészt azért előnyös, mert így könnyebb a hajtómű ki- és beszerelése, illetve a változtatható távolságnak köszönhetően többlépcsős hajtóművek is vizsgálhatóak a berendezéssel.

A mérés elvét a 3. ábra, a berendezést a 4. ábra mutatja. A 3. ábra jelöléseinek jelentése: 1: motor, 2: nyomatékmérő, 3: hajtómű.



3. ábra: A mérés elve



4. ábra: A berendezés

Mivel a mérés során a teljes hajtóművet forgatjuk, ezért a munkánk megkönnyítése érdekében olyan egység-hajtóműveket kellett tervezni, melyek megkönnyítik a szerelési pozicionálást és minél kisebb mértékben befolyásolják a forgást. Ezért hengeres kialakítású hajtóműveket terveztünk és gyártottunk le, melyek egytengelyűek a behajtó tengellyel. Ez utóbbira azért volt szükség, mert így a bemenő tengelyt könnyebb volt a nyomatékmérőhöz csatlakoztatni. A hengeres kialakítás azt is könnyebbé tette, hogy több egység-hajtóművet kombinálhassunk a mérésekhez, így többlépcsős hajtásokat is vizsgálhassunk.

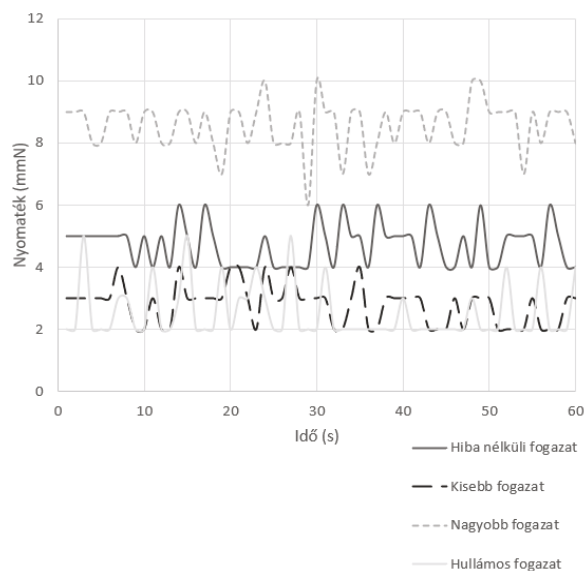


5. ábra: Az egység-hajtómű egylépcsős esetben

A berendezéssel végeztünk méréseket olyan hajtóművekre, melyek nem tartalmaztak hibás fogaskereket, illetve olyanokra is, melyeknek az összes foga egy-egy adott hibát tartalmazott. A hibák a következők voltak: megfelelő, túl kicsi fogvastagság, túl nagy fogvastagság, illetve egy hullámos fogazat, aminek fogvastagsága a megfelelő és a túl kicsi között ingadozik.

A 6. ábra diagrammján láthatóak az eredmények. A berendezés 2-4 Nmm-es pontossággal ugyanazt az értéket mutatta az azonos, egységes fogazatokra, amelyeknek görbéi fogvastagság alapján jól elkülöníthetőek. Tehát a berendezés képes arra, hogy kimutassa az ilyen hibák hatásait.

A hullámos fogazatnál pedig az átforgatási nyomaték görbéje kimutatja a fogvastagság ingadozását.



6. ábra. A mért átforgatási nyomatékok különböző fogazatokra

Azonban ennek a berendezésnek vannak hátrányos tulajdonságai is. Egyrészt a nyomatékmérő legkisebb mintavételi ideje 1 s, ami nem teszi lehetővé, hogy olyan fogaskerekeket vizsgáljunk, ahol csak egy-egy fog hibás. Másrészt, ami sokkal nagyobb hátrány, egy-egy mérés előkészítése, illetve az egységajtóművek beszerelése és beállítása órákat vett igénybe. Ez azért előnytelen, mivel a mérés időtartama ezzel szemben csak 1 perc. Így túl sok munkát kell ahhoz befektetni, hogy egy csekély eredményt elérjünk.

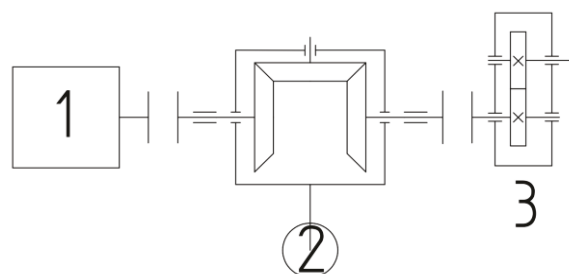
5. A MÁSODIK BERENDEZÉS

A másik berendezés dinamikusan képes nyomatékot mérni, azonban nem egy kereskedelmi forgalomban kapható dinamikus nyomatékmérőt használ, hanem egy differenciálmű elvén működő egységet.

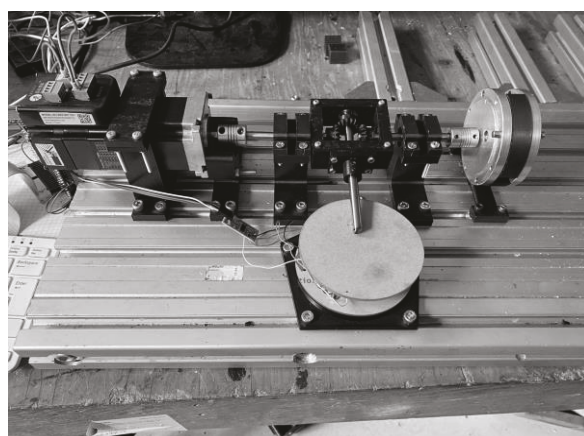
Ennek a lényege, hogy három kúpkerék kapcsolódik egymáshoz sorban, melyek közül az első a meghajtó motorhoz, a harmadik a mérendő hajtómű bemenő tengelyéhez kapcsolódik, a középső pedig szabadon el tud fordulni. Ahogy a motor meghajtja az első kúpkeréket és vele együtt meghajtja az egységajtóművet, a középső kúpkerék tengelye az előző tengelyekre mérőlegesen elfordul a vele egytengelyű mérőtengellyel együtt. A mérőtengely alatt egy mérlegcella is található, melynek mintavételi ideje átlagosan 0,3 s. Amikor a mérőtengely elfordul, terhelést ad a mérlegcellára, ami egy Raspberry Pi-n keresztül rögzíti a mért terhelést.

Ezután egyszerű számításokkal meghatározható, hogy mekkora a nyomaték.

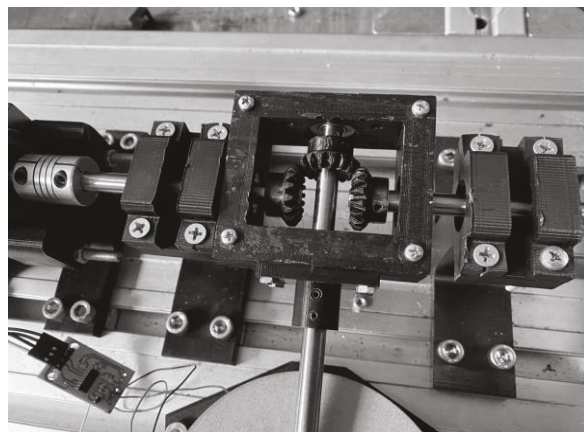
A 7. ábra mutatja a mérés elvét. A 7. ábra jelöléseinek jelentése: 1: motor, 2: nyomatékmérő, 3: hajtómű.



7. ábra. A mérés elve

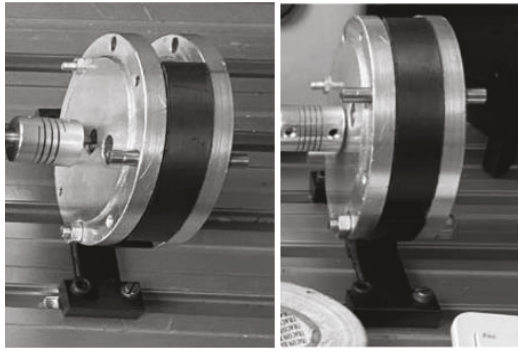


8. ábra. A berendezés



9. ábra. A kúpkerékek

Az eddig elvégzett próbamérésekhez a másik berendezéshez is használt egységajtóművek elemeit használtuk fel, de a berendezés új kialakításának köszönhetően az egységajtóműveknek sem kell hengeres kialakításnak lenniük, hiszen az nem forognak a vizsgálat közben.

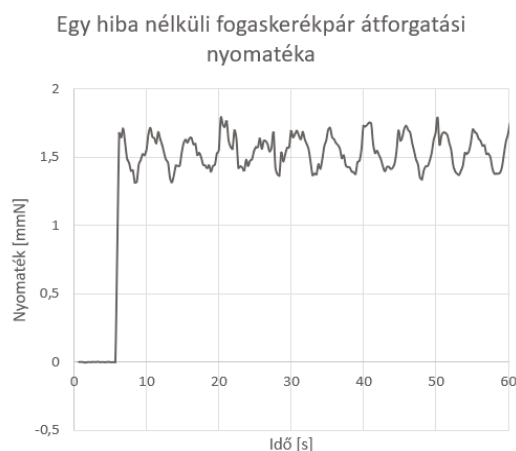


10. ábra. A mérésekhez használt egylépcsős hajtómű

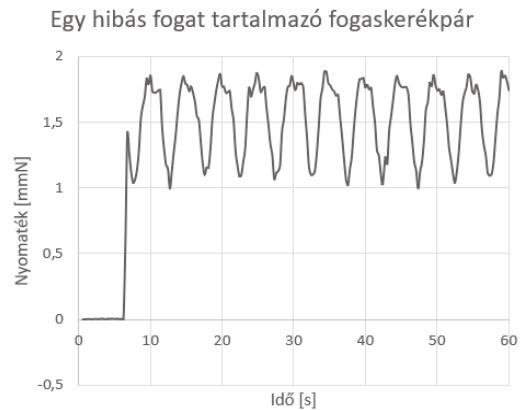
A berendezéssel elvégzett próbamérések-nél arra voltunk kíváncsiak, hogy az eszköz képes-e kimutatni annak a hatását, hogy a vizsgált fogaskerek között csak az egyiknek és csak egy foga tér el a többitől. Ezért 3D nyomtatással nyomtattunk 0,3 mm modulú, 53 és 60 fogszámú fogaskerékpárokat kétféle változatban. Az egyik esetben mindkét fogaskeréknek minden foga ugyanakkora volt. A másik esetben az 53 fogszámú fogaskerék egyik fogát változtattuk meg, mely így kisebb lett, mint a többi.

Az eredményeket a 11. ábra és a 12. ábra diagramjai mutatják. Ezekből látszik, hogy míg a hiba nélküli fogaskerékpárnál minden esetben 0,5 Nmm-en belül ugyanazt az értéket mértük, addig a hibás fogat tartalmazó fogaskerékpárnál van egy ismétlődő pont a diagrammon, ahol az átforgatási nyomaték közel 1 Nmm-rel eltér az átlagos értéktől.

A próbamérés eredményeiből arra következtethetünk, hogy a módszer megfelelő lehet a csak egy-egy hibával rendelkező kisméretű fogaskerékpárok vizsgálatára.



11. ábra. Egy hiba nélküli fogaskerékpár átforgatási nyomatéka



12. ábra. Egy olyan fogaskerékpár átforgatási nyomatéka, ahol az egyik fogaskerék egyetlen foga kisebb, mint a többi

Mivel ez a berendezés nem a teljes hajtóművet forgatja, hanem csak a hajtómű bemenő tengelyét egy tengelykapcsolón keresztül, ezért egy 1 perces mérés nem igényel több órás előkészítést és beállítást.

A berendezés egyetlen hátránya a 0,5 Nmm-es pontosság, ami az első berendezés 2-4 Nmm pontosságához képest ugyan előrelépés, de a jelenleginél kisebb modulú fogaskerekknél már kevésnek bizonyulhat. Pontosabb gyártással a pontosság azonban növelhető.

ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben két olyan berendezést mutattunk be, melyek lehetővé teszik a kisméretű műanyag fogaskerek hibáinak vizsgálatát az átforgatási nyomaték mérése alapján. Bár az átforgatási nyomaték mérésének alapelve mindkét esetben hasonló, a két berendezés teljesen más megközelítést alkalmaz. A cikkben mindkét berendezés működése, előnyei és hátrányai is bemutatásra kerültek.

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A szerzők szeretnék megköszönni Potyka Attilának a segítséget, aki nélkül nem valósulhattak volna meg a berendezések és a mérések.

IRODALOM

- [1] VDI 2731 Mikrogetriebe, Grundlagen. BeuthVerlag, Berlin, 2009.
- [2] VDI 2736 Thermoplastische Zahnräder, BeuthVerlag, Berlin, 2014.
- [3] MARADA I., BIHARI J.: Designing a new type of drive unit for the analysis of small plastic gears, Multidisziplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye 11: 5 pp. 245-250., 6 p., 2021, doi: <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.5.25>

ZAJSZEGÉNY, MÉGIS HATÉKONY KERTMŰVELÉS FELÉ

TOWARDS A LOW-NOISE YET EFFICIENT GARDENING

Németh Géza adjunktus, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

ABSTRACT

The garden is for us. Our garden is also for people passing by. Among our senses, sight, hearing and smell are the ones that attract or repel a garden. In order to have a pleasant sight and smell, the garden must be cultivated. Can this be done quietly? Can this be done in larger gardens, or on the wildened banks of a creek? We want to answer these questions in our article.

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt néhány évben több olyan hatás ért bennünket, illetve több olyan jelenségre lettem figyelmes, amelyek e cikk megírására ösztönöztek. A világunkban jelentkező kihívások és kiütkeresések egy-egy ember hatáskörében is értelmezhetőek. Hatalmas változást okozott a világvilágjárás – sokan azóta kizárólag otthon dolgoznak, otthonról szinte ki sem mozdulnak. Ugyancsak ijedelmet okozott az energiafüggőségünk újabb, erőteljes észlelése. A környezetszennyezés régebbi ügy, amire a körkörös gazdaság próbál megoldást találni, de az egyén egyelőre igen szerényen menti a menthetőt. A fogyasztói társadalom újabb és újabb termékeket erőltet a tömegekre, amelyek árában már benne van azok ártalmatlanítási költsége, de a „tudatos fogyasztó” elvárja, hogy a hulladék összegyűjtését más végezze helyette. Észleljük, hogy az egyének alapvetően jószándékúak, de cselekedeteikben ez még nem tükröződik – rossz szokásaik, függőségeik miatt nem azt teszik, amit szeretnének tenni, esetleg tudatlanságból nem azt teszik, amit tenniük kellene.

A cikk megírásának közvetlen előzménye egy Élelmiszertermelés, ökotermelés című tárgy tematikájának kidolgozása volt, ennek egy szelete a zajszegény kertművelés.

Kertművelés alatt nem csak a családi vagy társasházias övezetek, kiskertek gondozását értjük, hanem a nagyobb városi kertekét, beépítetlen füves, fás területekét is. Ide tartozik a fák, bokrok ültetése, a gyümölcsfák metszése, a lombos fák koronaigazítása, az elszáradt gallyak eltávolítása, a kipusztult fák pótlása. A gyepek rendszeres munkát igénylő feladat. A zöldségtermesztés jóval összetettebb feladat, ehhez többek között a talajlazítás, a tápanyag és nedvesség utánpótlás, a gyomeltávolítás, a nedvesség visszatartása (ami például a talaj

takarása vagy hajszálcsovésségének megszüntetése lehet) tartozik.

A mai ember tisztában van a műszaki fejlődés eredményeivel, még a kertművelés területén is. Ismeri a benzin üzemű és a villamos hálózatról működtethető kisgépeket, és hallott a villamos akkumulátoros szerszámokról. Nem érzékeli, viszont, hogy a hagyományos kéziszerszámok területén is hatalmas fejlődés ment végbe az elmúlt évtizedekben, illetve már nem ismeri, ezért el sem tudja képzelni, hogy azok a szerszámok, amelyek egy évszázada szinte kizárólagos termelőeszközök voltak, egy jóval kisebb földterületen ma is hatékonyan használhatóak lennének. A mai ember arról sem nagyon tud, hogy a mozgásigény kielégítésére nem csak megregrágra sporteszközök alkalmasak, hanem a kertművelés bizonyos eszközei is. Nem nagyon hallott arról, hogy a szomszéd és a távolabbi országokban időnként kaszálóversenyeket rendeznek.

Végül a zajszegény, és kisebb balesetveszéllyel járó, ezért könnyedebb öltözékben is használható eszközökről szeretnénk beszélni, amelyek nem igényelnek külső energiaforrást, és amelyek feltétlenül kedvező helyettesítői lehetnek a mai kellemetlenül zajos, porkeltő, és emberre-állatra veszélyes gépeknek.

2. TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

Az emberiség történetében megfigyelhető a kertművelés eszközeinek fejlődése. Az újabb anyagok, a fémszerszámok anyagának ötvöztetése, hőkezelése, hideg- vagy melegalakítása, az újabb szerszám-geometria egyre kisebb energiaigényű, egyre kopásállóbb szerszámokat eredményez. Az újabb fajta forgácsoló szerszámok megjelenése csökkenteti a forgácsmennyiséget és egyben a forgácsolás energiaigényét – gondoljunk a balta helyett a fűrész használatára az erdőművelésben. Az állati és természeti energiaforrások hasznosítása is fejlődést eredményezett.

Az eszközök szinte mind alacsony zajhatásúak, még a kibocsátott zaj és az elvégzett munka aránya tekintetében is kedvező a helyzet. Igen ritka a kifejezetten zajt keltő tevékenységek köre. Talán csak a háziállatok őrzésével, ösztönzésével, illetve a madarak elriasztásával kapcsolatos szándékos zajkeltés (ostor, kereplő) jelent kivételt. Ma viszont olyan „eszement

találmányok” jelennek meg a kertművelésben, mint a robbanómotoros lombfúvó, mely a hatalmas zajhatás mellett egy település szállópor koncentrációját is emeli.

3. HATÉKONYSÁG

Megjegyezzük, hogy nem akarunk versenyre kelni a világgazdaság fő szereplőivel. Nem a megélhetésünk érdekében végzett munka hatékonyságának növelésével kívánunk foglalkozni, hanem a szabadidőnkben, a saját vagy tágabb közösségünk érdekében végzett munka hatékonyságát kívánjuk ésszerű szinten tartani, ráadásul úgy, hogy az környezetkímélő, magunkat építő elfoglaltság legyen.

Nem akarunk versenyre kelni a külső energiát is felhasználó munkagépekkel sem, bár az eszközbeszerzés befektetési igényében, az elvégzett munka minőségében, valamint a keletkező termék hasznosíthatóságában egyértelműen kedvezőbb az eredmény az értekezésünk tárgyát képező tevékenységek javára.

Szerszámaink figyelembe veszik testi erőnk korlátját, továbbá ergonomikus kialakításúak. Szinte mindegyik művelet estén használatuk csendesebb, kevésbé zavarja a környezetünkben élőket. A szerszámok működtetése némely esetben kizárólag kezünk, ujjaink erőkifejtésével valósul meg (pl. egykezes metszőolló), másoknál karunk ereje is szükséges (pl. kézfűrész, balta), ismét másoknál felsőtestünk erőkifejtésére is szükség van (pl. fejsze, kasza, levélseprő), végül a lábunk által kifejtett erő is közreműködhet (pl. ásó).

Az erőigényt a szerszám élgeometria, a súrlódás, a faforgácsnak vagy a megművelt termőtalajnak a szerszámra tapadása és a forgácsolóél tartóssága határozza meg. Az erőkifejtés növelhető karos áttétellel (egy és kétkézes metszőolló, sövénynyíró) vagy energia-átalakítással (például egy kapa, vagy még inkább egy hosszabb nyelvű fejsze esetén, ahol a nagy mozgási energia igen rövid úton alakul át nagy erőhatássá). Mennél kisebb a fékezési út, annál nagyobb a lassulás, és így a forgácsolóerő (keményfa tuskón rövidebb a fejsze és a hasítandó rönkdarab fékezési útja, tehát nagyobb forgácsolóerő érhető el). A sebesség, és ezáltal a mozgási energia a szerszámnyél hosszával növelhető. A szükséges erőkifejtés csökkenthető egy nagyobb forgácsszélességgel (kihajtogatott fűrészfogakkal), ugyanakkor a művelet periódusideje is csökkenthető.

A kifejtett teljesítmény az erőkifejtés és az erőirányú sebesség szorzata, viszont ez nem kizárólagos hatékonysági mérőszám. Ha egy keskenyebb, ugyanakkor a faág keménységéhez nedvességtartalmához igazodóan kihajlított

fűrészlapot veszünk figyelembe, annak működtetése sokkal kisebb erőigényű a keskenyebb forgácsolási vonal miatt. A forgácsolási sebesség is jóval kisebb, tehát tartós üzemben 100 W teljesítmény kifejtése biztosan elegendő. Ha nem volna elég erő egy nagy farönk fűrészelésére, a keresztvágó fűrész forgácsoló éleinek sorát nem egyenes vonal mentén, hanem egy íves pályán helyezik el, ráadásul nem egyenes vonalban vezetik a fűrész két végét, hogy egyszerre kevesebb forgácsoló él lépjen működésbe, ugyanakkor egyenletes legyen a szerszám előrehaladása.

4. A KERTMŰVELÉS TERÜLETEI

A bevezetőben már említettük, milyen területeket különböztethetünk meg a kertművelés tevékenységi körében. Ezek a tulajdonos vagy a kezelő, a terület nagyság és művelési ágazat szempontjából igen eltérő feladatokat jelentenek. Egy sorházas övezet néhány négyzetméteres előkertjétől a társasházak nagyobb füves-bokros-fás területein át juthatunk el a családi házak és hétvégi kertek nagyobb művelendő területeihez. Vannak egyesületek használatában lévő területek, városi közterek, játszóterek, nagyobb füves-fás ligetek, nagyobb füves területek, útszélek, patak- és folyópartok, töltések. A vegetációs időszakban a központi területeket az önkormányzatok havonta gondozzák, a kieső területeket évente kétszer. A magán- vagy közösségi kezelésben lévő területeket gondozása vérmérséklet szerint, így igen eltérő minőségben történik.

Az előbbiekből látható, hogy a műveletek legnagyobb része a gyepek, a bokrok és a fák gondozása, csak igen kis hányad tartozik a kerti virágok, zöldségfélék ültetésére és gondozására. Egy elvadult terület esetén természetesen nagyobb erőfeszítéseket igényel, a behurcolt (invazív) növényfajok visszaszorítása (pl. japánkeserűfű) nem mindig eredményes gyakori kaszálással.

Felvetődik a gondolat – ki végezze a munkát. Biztosak vagyunk abban, hogy ezt a „lenézett” tevékenységet csak közmunka keretében foglalkoztatott vendégmunkások tudják elvégezni, pályázatokon beszerzett munkagépekkel?

5. ÖSSZEHASONLÍTÓ ELEMZÉSEK

Egy gyümölcsös fő munkálatai a tavaszi metszésen, koronaigazításon, a gomba és rovarkártevők elleni védelmen és a nyári-őszi szüreten kívül az aljnövényzet rendszeres kezelése. Ez lehet a kaszálás. A hagyományos kézi kaszának több helyettesítője terjedt el az elmúlt fél évszázadban. Ezek a helyettesítők nem üzemeltethetőek bármikor, hiszen igen zajosak.

Egy 300 négyszögöles terület kaszálását (1 négyszögöl ~ 3,59 m²) érdemes a gyümölcsfák körül kezdeni, a Gleason fogazat lefejtéséhez hasonló köríves pályán előre haladva. A kasza a fa tövébe rendezi a levágott fűvet, amely ott jó helyen van. A köztes terület levágása is gyorsan megy. Egy ugyanekkora terület hagyományos robbanómotoros forgókéses fűnyíróval történő megművelése majdnem ugyanannyi időt vesz igénybe, ráadásul jóval nagyobb zaj- és porterheléssel jár. Damilos fűkasza használatakor még be is kell öltözni a nyári nagy melegben, az arcot és szemet erősen védve. Ha mindez egy hétvégi kiskertben történik, ott még a helyi rendelkezéseket is be kell tartani a kertművelés időzítésének tekintetében.

A mai ember már nem tudja elképzelni, hogy egy kisebb faágat könnyebben-gyorsabban és főleg sokkal kisebb balesetveszéllyel lehet eltávolítani hagyományos szerszámmal, mint egy külső energiát igénylővel. Nem tudja elképzelni, mert nem látott ilyet. Nem látott, pedig gyerekként még nem okos eszközök virtuális világában leledzett.

Az átlag mai ember fizikai ereje és állóképessége kisebb, mint 100 évvel ezelőtt volt. De még ez a kisebb ilyen irányú tehetség is elegendő lenne arra, hogy szabadidejét értelmesen, okosan, környezettudatosabban élje, esetleg a szűkebb és tágabb közösségének az építését is szolgálva. Igen, vannak igen elfoglalt emberek, akik a szükséges mozgásigényüket csak futópályán (esetleg futópadon) tudják kielégíteni. Viszont egy kisvárosban bőven van lehetőség a természetesebb és hasznosabb mozgásformákra. Amihez nem kell beülni a gépkocsiba sem, csak észre kell venni, mit lehet előbbre mozdítani „Azok vagyunk, amit rendszeresen teszünk. A kiválóság tehát nem tett, hanem szokás.” Az Arisztotelésznek tulajdonított gondolat szerint nem kell nagy dolgokra gondolni, de azt rendszeresen kell tenni. A kisebb és nagyobb iskolásnak, a sportolónak, a szakmunkásnak, az egyetemi hallgatónak, a diplomás szakembernek, a művésznek, a tudósnak és a politikusnak, vezetőnek és beosztottnak egyaránt.

6. ÉPÍTŐ TEVÉKENYSÉGEK

Egy település polgárai, egy munkahely alkalmazottai képesek egy-egy nemes cél érdekében összefogni. Jótékonykodnak véradással, pénzbeli adományozással, együtt sportolnak, közösen végeznek könnyű fizikai munkát szabadidejükben. Bár ezek az összefogások többnyire kampány-jellegűek: egyszeri alkalmak vagy évenként visszatérők, nagyon jó közösségszervezők.

Miért ne lehetne ezeket a közösségeket kicsit gyakrabban egy irányba állítani, egy település

adott részének – közterületének – „örökbe-fogadása” érdekében. Ezek a közösségek az adott közterülettel kapcsolatos munkákat szívesen elvégeznék. Széppé tehetnék egy patakpart szakasz, megtisztelve az arra járókat. Örökbe fogadnák anélkül, hogy több négyzetméteres rozsdamentes acéltáblákkal reklámoznák magukat, mint örökbe fogadó közösséget.

7. AZ ÉPÍTŐ TEVÉKENYSÉGEK TANÍTÁSA

Minden tevékenység végzésének képessége valamilyen tanulási folyamaton alapul. A tanulás hatékonyabb, ha azt nem csak a magunk módján, hanem hozzáértők követésével próbáljuk végezni. Az iskola az az intézmény, amely a tanulási folyamatot igyekszik meggyorsítani.

Ha egy terület rendezett, annak gondozása már könnyű, azt egy kisebb gyakorlattal rendelkező ember is el tudja végezni úgy, hogy a tevékenység közben a lelkesedése nem csökken, sőt még sikerélménye is lesz. Nem egy meredek patakparton háromméteresre nőtt japánkeserűfű erdőben, hanem egy lankásabb vagy vízszintes füves területen lehetne a tanítást megkezdeni a kedves önkéntesek részére. Jól járnának a kisebb fák is, hiszen az óvatosabb mozgású kézi kasza nem hántaná le a kérgüket.

8. JÓ PÉLDÁK

„Bármit tanulsz, magadnak tanuld.” A latin bölcsességet kiegészíthetjük azzal, hogy bármi hasznosat teszünk, ügyesedünk. Arról nem is beszélve, hogy ha elég gyakran tesszük, megszeretjük. Nem csak a sportolók és zeneművészek életében elengedhetetlen a rendszeres gyakorlás, minden más tevékenység esetén is az. Az igényesség növekszik, következménye pedig a jobb minőség, a jobb eredmény. Ami a fogékony korban lévőkben (de azokban is, akikben még szunnyad a jószándék) felkeltheti az igényes cselekvés iránti vágyat.

Divatos dolog egy cég életében a főtevékenységen kívül minden munkát kiszervezni. Az építőiparban látunk olyan példát, amikor a főtevékenységet is kiszervezik, aztán a saját munkatársak napokig munka nélkül bujkálnak az építési terület valamely árnyékos szegletében. Társasházi közösségek maguk meg tudnák oldani azokat a feladatokat, amelyeket egy külső cég közbeiktatásával mások végeznek el helyettük. Kialakul egy teljes távolságtartás a közösségi feladatokkal szemben. Fizettem érte, így elvárom, hogy mások dolgozzanak értem vagy helyettem. Autóval járok, cipőm nem érinti a járdánk aszfaltját, semmi közöm a házam vagy lakásom bejárati ajtaján kívül eső dolgokhoz.

Ezt a távolságtartást kellene csökkenteni azzal, hogy megszólítsuk azokat, akik még kiteszik a

lábukat az utcára, akik még hajlandóak a házuk környezetében gyalogosan is közlekedni. Ők azok, akik esetleg a futás mellett másfajta mozgásformát is hajlandóak megtanulni.

Amit az ember nem ért, amiben nincsen tapasztalata, az nehéz neki. Amikor már kipróbált valamit, és sikerült, akkor az már könnyű. Ha csak annyi eredménnyel jár egy kéziszerszám kipróbálása, hogy megérzi az ember, milyen könnyű vele dolgozni, már megérte. Bármelyik életszakaszban lesz hová visszanyúlnia, és bátran a jobbat választania.

9. MÚZEUMOK HELYETT

Nem a mai mezőgazdaság átalakításával kívánunk foglalkozni, nem is a településektől távol eső utak mentének rendben tartásával. Kifejezetten a településeken belül, és azok közvetlen közelében szeretnénk rendezett, emberhez méltó világot kialakítani. És mindezt úgy, hogy a karbantartás mennél kevesebb kellemetlenséggel járjon, természetellenes zajok ne zavarják a településen élőket.

Elfogadjuk, hogy egy elvadult kert, játszótér, köztér, patakpart első rendbetétele nagyobb erőfeszítéssel, esetleg gépi rásegítéssel, így nagyobb kellemetlenséggel jár, de a rend további fenntartása már nem igényli ezt.

Nem kell az évszázadok során tökéletesedő, és még ma is fellelhető eszközöket néprajzi múzeumokba száműzni. Fedezzük fel újra ezeket a hatékony és környezetbarát eszközöket! Vegyük észre, hogy vannak, akik ezeket ma is ügyesen használják!

Újra kell tanulni ezeknek az eszközöknek a használatát. Ha már úgyis szükségünk van valamennyi mozgásra, az ne kizárólag egy labdarúgó pálya körüli 400 m-es futókörre, vagy egy úszómedence 50 m-es hosszaira korlátozódjon.

10. A MOZGÁS HASZNA

A mozgás lehetőségéért általában fizetni kell. A legtöbb esetben fizetni kell. Fizetni kell egy tömegsportrendezvény szervezéséért, a tornatermek, a sportpályák, a játszótérek felépítéséért és működtetéséért. Az egyén, az iskola, a települési önkormányzat vagy a munkahely fizet érte. Meglehetősen sokat.

A haszon a mozgás öröme, az erőnlét fenntartása, az egészségesebb élet reménye, a közösség élménye.

A kertművelésnek egyéb haszna is lehet. Nem feltétlenül az egyén számára, a haszon inkább valamilyen közteher kiváltásában nyilvánul meg. Ha csak egy nagyobb önkormányzati füves területet tekintünk, a gondosan levágott síkterület vagy patakpart nagy mennyiségű vegyes réti

szénát adhat, amit már érdemes a település állatkertje céljaira felajánlani. A mai gyakorlat a szeméttel kevert széna valahová elszállítása, amely gyakorlatot ideje lenne meghaladni.

Hasonlóképpen visszatetsző, hogy a fák koronaigazításakor keletkező gallyakból pár száz kg-nyit tud egy öttonnás önrakodó teherautó elszállítani. Ennek alternatívája egy szecskázógép, mely a keletkezés helyén hatalmas zajterheléssel, jelentős élőerő igényvel és hatalmas energiával csökkenti a szállítási költséget. Pedig egy értelmes közösség egyszerű kéziszerszámokkal gyorsan úrrá tud lenni a látszólag bozontos (ágas-bogas) helyzeten.

11. MI A FEJLŐDÉS?

Vannak területek, ahol az egyre nagyobb teljesítmény szolgáltatja a jobb hatékonyságot. A növénytermesztésben együtt jár ezzel a monokultúrák minden hátránya. Településeink határain belül nincsen ilyen veszély, hiszen nem lehet nagy gépeket használni. Felvetődik a kérdés: kellenek-e egyáltalán kertművelő gépek? A válasz egyszerű: ahol csak lehet, szorítsuk vissza ezek használatát. Településeink rendezettsége nem a gépek számával arányos. Jó minőségben meg lehet művelni az erdőket, a bokros és füves területeket emberi erővel működtetett kéziszerszámokkal. Az sem baj, ha az egyes területek némi időeltolódással kerülnek sorra. Ez is a természetes állapot felé mutat, a rovar- és madárvilág kedvezőbb élőhely kialakítása felé. Vannak természetesen olyan fertőzött területek, mint már említettük, ahol a gyorsan növekvő behurcolt fajok fokozatos visszaszorítása csak igen gyakori műveléssel képzelhető el.

12. A MUNKA MEGSZERVEZÉSE

A lakóhely és a munkaterület a lehető legközelebb legyen. A munka- és védőeszközöket, hasonlóan a tömegsportrendezvények résztvevőikéhez, minden önkéntes saját maga szerzi be, saját maga tulajdonolja, saját maga tartja rendben. Egy településen először legfeljebb néhány embert lehet megnyerni az ügynek, a települési önkormányzat egy-két tagján kívül. Ha sikerül a kezdet, akkor az eredményes folytatás már csak idő kérdése.

13. ÖSSZEGZÉS

Nem kell minden közérzet-javító intézkedést felülről várni, nem minden pénzkérdés, magunk is részt vehetünk a magunk életének megkönnyítésében. Ha ráadásul ezzel környezetbarát módon élünk, mások életére is jó hatással, az feltétlenül kihat mindenki életére, mindenki gondolkodásmódjára és egyszer talán mindenki cselekedetére.

AZ ENERGIATÁROLÁS MECHANIKAI TECHNOLÓGIÁI

MECHANICAL ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES

Fenyvesi Sándor*, Orbán Ferenc**

ABSTRACT

The energy production of different renewable energy sources is fluctuating and the management of the changing energy needs requires energy storage. Battery system and Power to Gas type storage can also be used for energy storage. In practice, these two technologies are preferred in Hungary. In the last couple of years, studies have been published on gravitational energy storage. A known method of gravity energy storage is when water is pumped up into a high-altitude reservoir and the energy is released from there during use, while the water flowing down gives off energy. A few years ago, the possibility arose that energy could be stored in abandoned mine shafts by moving large weights. In the article, we describe several solution options for energy storage.

1. BEVEZETÉS

Bányamérnök barátaink hívták fel a figyelmünket az energiatárolás lehetőségéről bányászati aknákban. Az Egyesült Királyságban komoly összeggel támogatták a módszer kutatását.

Más un. gravitációs energia tárolással több országban is foglalkoztak, sőt megvalósított projektek is vannak. Erről a témáról több fórumon is tartottunk előadást és cikket is írtunk. Számunkra az a meglepetés, hogy Magyarországon nincs szándék az ilyen jellegű kutatásra, holott bizonyítottan jó megoldások léteznek.

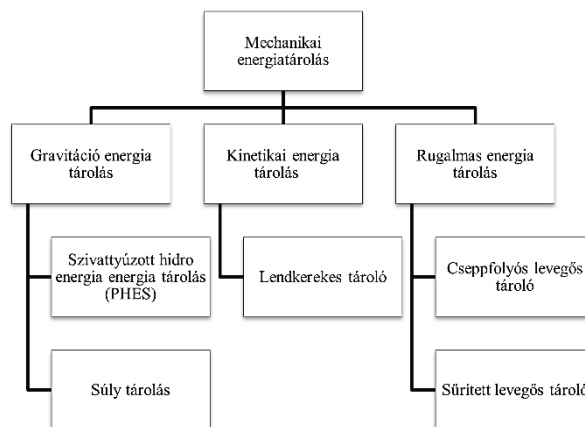
Az energia típusú tárolási technológiák nagy mennyiségű teljesítmény tárolásra alkalmasak, míg az teljesítmény típusúak nagy mennyiségű energia cseréjére alkalmasak egy rövid idő alatt.

Az energia tárolási technológia [1] irodalom szerint:

- Energia típusú és teljesítmény típusú [3].

Energia típusok: Kémiai, hőenergia és mechanikai energiatárolók

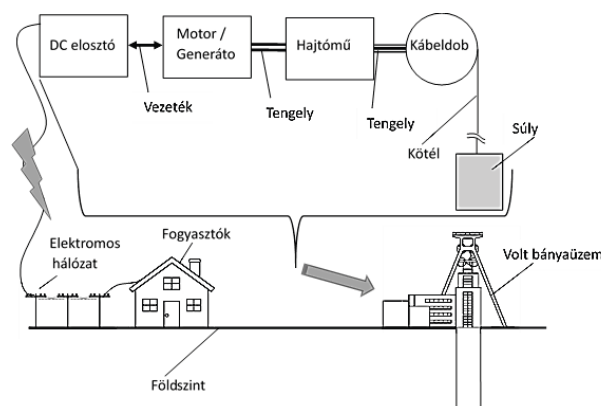
Teljesítmény típusok: elektrokémiai és elektromos



1. ábra Az energiatárolás lehetőségei

Az energiatárolók használata számos előnnyel jár, mint például az energiafogyasztás optimalizálása, energiafüggetlenség, rugalmasság. E mellett lehetővé teszik a megújuló energiák hatékonyabb integrálását a rendszerbe. A 2. ábra mutatja a gravitációs energiatároló rendszer elvi vázlatát.

Az energiatárolók használata elősegíti a fenntarthatóbb energiahasználatot és a környezetbarát energiatermelést.



2. ábra Az energiatároló rendszer sematikus ábrája

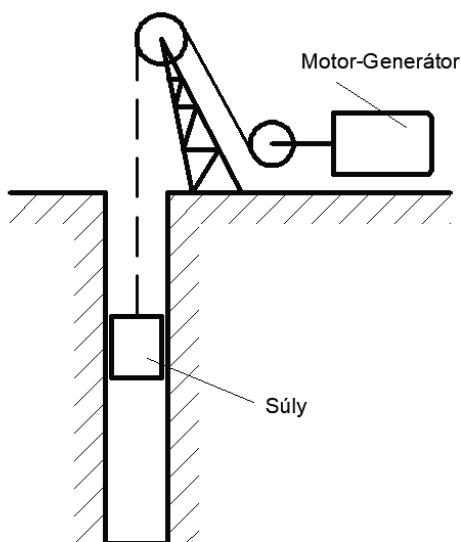
* tanársegéd, Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar, Gépészmérnöki Tanszék

** professzor emeritus, Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar, Gépészmérnöki Tanszék

2. ENERGIATÁROLÁSI MEGOLDÁSOK

A gravitációs energia tárolás nagy tömegek mozgásával tárol energiát. Több cikk jelent meg az elhagyott bányákban történő energia tárolására. A technológia hasonlít a daruk vagy liftek működéséhez. Ha a nagy súly leengedjük az aknába akkor energiát termelünk, ha felesleges energia van, akkor a súlyokat felemeljük. Ezt a tárolási módszert hívjuk súly tárolónak [2].

A tárolás elve a 3. ábrán látható.



3. ábra Gravitációs energiatárolás

A tárolt energia mennyisége egyenesen arányos az akna mélységével és a mozgított súllyal.

$$E = \eta \cdot m \cdot g \cdot H \quad (1)$$

ahol,

η - hatásfok

m - mozgított tömeg

H - akna mélysége

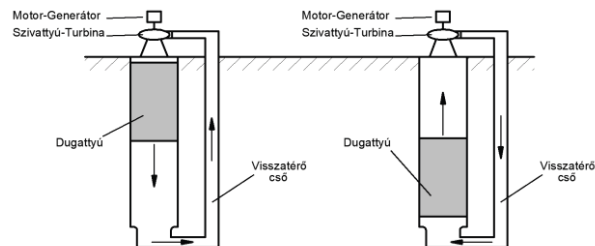
Egy példa, ha az akna mélysége 1250 m és a mozgított tömeg 3.000 tonna, úgy 10 MWh energia tárolható, ami nem tűnik nagyknak. A Mecsek hegységben 34 db használaton kívüli akna van, átlagosan 500 m mélységűek. Így 1000 tonna tömeggel 1,3 MWh energia tárolható.

Optimális esetben, ha az összes akna dolgozik, úgy 44 MWh energia tárolható. A jelen helyzetben a legnagyobb probléma, hogy az aknákat ki kell tisztítani és a mozgított nagy tömeg miatt a meglévő akna tornyok nem használhatók, vagy meg kell azokat erősíteni. A skót vállalatot Gravitricity-nek hívják, több tanulmányt is írtak a függesztett súlyú energia tárolásáról, valamint kipróbálására egy 16 m-es

tornyot építettek, amiben két db 25 tonna tömeget mozgattak.

Az irodalomban fellelhetők olyan megoldások, amikor nem egy nagy súlyt mozgatnak, hanem több kisebbet, így az emelőszervezetet kisebbre lehet méretezni, ellenben a súlyokat daruval el kell raktározni felső szinten.

A bányászati akna felhasználásával működik a dugattyús energiatároló. A dugattyús energiatároló elvi vázlatát a 4. ábra mutatja.



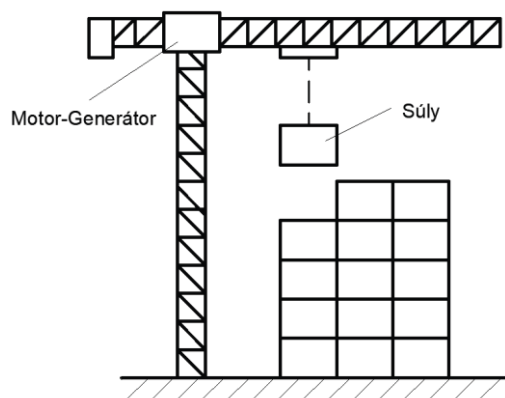
4. ábra Dugattyús energiatárolás

Egy szigetelt vízzel töltött bányászati aknában egy (henger) dugattyú helyezkedik el. Az akna alul és felül egy visszatérő csőhöz kapcsolódik, a visszatérő cső vízszintes szakaszán egy szivattyú – turbina van beépítve. Ha energiát tárolunk, úgy a felső szivattyú a felső kamrából az alsó kamrába szállítja a vizet, így a dugattyút felemeli. Az energia termelésekor a dugattyú visszanyomja a vizet és a turbinát hajtja.

A technológia egyszerűnek tűnik, azonban az akna falvastágát a nagyobb nyomásra kell méretezni, valamint a dugattyú tömítését is meg kell oldani.

A toronytípusú energiatároló esetében 35 tonnás tömbökből tornyot építünk, amikor energiát tárolunk.

A toronytípusú energiatároló elvi vázlatát az 5. ábra mutatja.



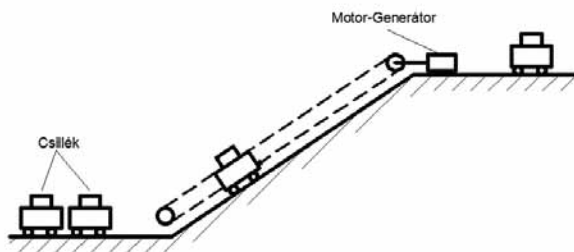
5. ábra Toronytípusú energiatároló

Egy Svájcban megépült energiatároló egy 6 karú toronydaru, ami a daru test köré egy tornyot épít [7]. A tárolási kapacitás 20MWh-80MWh is lehet.

Egy további energiátárolási megoldás vasúti technológiát használ [5]. Ez lejtős vidékekre telepíthető. Nagy tömegű csilléket vasúti pályán egy magasabb helyre szállítunk lánchajtás segítségével amikor energiát tárolunk. Amikor a hálózatnak áramra van szüksége, úgy a folyamat megfordul a csillének lefelé haladva a mechanikai energiát elektromos árammá alakítják.

Az ARES Nevada cég egy 50 MW-os energia tárolót fejleszt kb. 20 hektáron egy kavicsbányában. Ez a projekt 210 csilléből álló 75000 tonnát nyomó jármű flottát alkalmaz és 10 sínpárból áll.

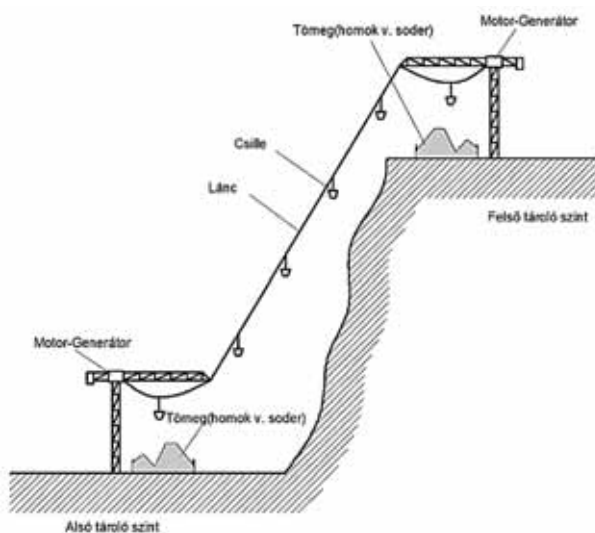
A kötőpályás vasúti energiátároló elvi vázlatát az 6. ábra mutatja.



6. ábra Kötőpályás vasúti energiátároló

Ugyancsak hegyes terepre telepíthető a hegyi energia tároló [4]. A rendszer két daru telepítéséből áll egy meredek kanyon vagy hegy szélén, amelyek elegendő kinyúlásúak ahhoz, hogy homokot, vagy sódert szállítsanak a hegy alján lévő tároló helyről a hegy tetején lévő tároló helyre.

A hegyi energiátároló elvi vázlatát a 7. ábra mutatja.



7. ábra Hegyi energiátároló

Az a módszer kisebb energia tárolására alkalmas.

A lendkerekos tároló kinetikus energia formájában tárolja az energiát [6]:

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad [J] \quad (2)$$

ahol,

E – tárolt kinetikus energia

I – tehetetlenségi nyomaték

ω – lendkerék szögsebessége

A felhasználható energia:

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) \quad [J] \quad (3)$$

ahol,

E – tárolt kinetikus energia

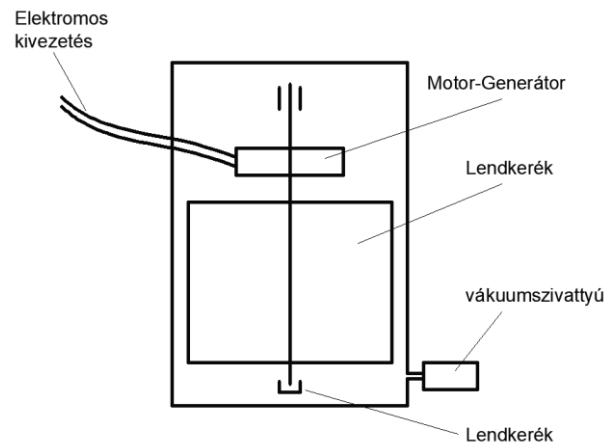
I – tehetetlenségi nyomaték

ω_{max} – lendkerék maximum szögsebessége

ω_{min} – lendkerék minimum szögsebessége

A minimális szögsebesség értéke a maximális szögsebesség fele és harmada között van

A lendkerekos energiátárolás elvi vázlatát a 8. ábra mutatja.



8. ábra Lendkerekos energiátárolás

A lendkerék egy házban helyezkedik el, amelyben vákuumot hozunk létre. A lendkerék maximális fordulatszáma 50.000 f/perc. A tárolható energia 133 kWh is lehet.

3. A KÜLÖNBÖZŐ ENERGIÁTÁROLÓK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA

Az összehasonlítás szempontjai: az energiátárolás kapacitása, az energia csere hatásfoka, a biztonság, a földrajzi adottságok, a válaszidő és az élettartam.

3.1 Az energiatárolás kapacitása

A kapacitás bővítése lehet az összehasonlítás alapja.

Könnyen bővíthetők a súlytárolók, a hidraulikus, a toronyszerű, a hegyi és a vasúti tárolók a geográfiai adottságoktól függően. A lendkerekes tározó kapacitása korlátozott.

3.2 Az energia csere hatásfoka

Az összes energiatároló típus hatásfoka magas, 80 % körül van. A hatásfokot a súrlódási veszteségek csökkentik.

3.3 Biztonság

A módszer biztonsága a rendszer meghibásodásával kapcsolatos. Az egyszerűbb energia tárolók, mint a súlytároló vagy a lendkerekes kevésbé hibásodnak meg.

A toronyszerű és a hidraulikus tárolóknál nagyobb valószínűséggel, míg a hegyi és vasúti tárolóknál többször lehet meghibásodás ui. szabadon álló szerkezetek.

3.4 Geográfiai adottságok

A geográfiai adottságok meghatározzák a tárolási módszerek alkalmazhatóságát. A súlytárolók és a hidraulikus tárolók használhatók, ha vannak elhagyott aknák. Megfelelő terepviszonyok esetén a hegyi és vasúti technológiák használhatók. A toronyszerű és a lendkerekes tárolóknál nincs kötöttség.

3.5 Válaszidő

Egy alapvető jellemző az energiatároló rendszer válaszüzeje. Ez azt jelenti, hogy milyen gyorsan tud villamos energiát tárolni a villamos rendszerben.

A leggyorsabb a súly, a hidraulikus és a lenkerekes tároló, kevésbé gyors a toronyszerű, a hegyi és a vasúti tároló.

3.6 Élettartam

Az élettartamra szinte mindegyik tárolási módszer 30-50 évet jósol.

Természetesen a karbantartás is fontos, de leginkább a súrlódásos kopás befolyásolja az élettartamot.

A módszerek számszerűsített összehasonlítása nem egyszerű, egy lehetőség lehet az energia sűrűség alapján, ami a tárolt energia és a tároló súlyának viszonya.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben hat különböző energiatárolási módszert ismertetünk. Az ismertetett energiatárolók Magyarországon megvalósíthatók. Érdemes lenne megvizsgálni gazdasági szempontból is, hogy melyik a legmegfelelőbb a hazai környezetben. Az energia tárolásról írott cikkeket tanulmányozva megállapítható, hogy mindegyik módszernek vannak lelkes támogatói.

5. IRODALOM

- [1] TONG, W., LU, Z., SUN, J., ZHAO, G., HAN, M., & XU, J.: *Solid gravity energy storage technology: Classification and comparison*, *Energy Reports*, Vol. 8, (2022), pp. 926-934, doi: 10.1016/j.egy.2022.10.286
- [2] MORSTYN, T., CHILCOTT, M., & MCCULLOCH, M. D.: *Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts*, *Applied energy*, Vol. 239, (2019), pp. 201-206, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.226
- [3] DR. IMRE A., KUMMER K.: *Szezonális és hosszútávú energiatárolási lehetőségek*, *Energiagazdálkodás*, 62.évf., (2021), pp. 24-31
- [4] HUNT, J. D., ZAKERI, B., FALCHETTA, G., NASCIMENTO, A., WADA, Y., & RIAHI, K.: *Mountain Gravity Energy Storage: A new solution for closing the gap between existing short-and long-term storage technologies*, *Energy*, , Vol. 190, (2020), doi: 10.1016/j.energy.2019.116419
- [5] CAVA, F., KELLY, J., PEITZKE, W., BROWN, M., & SULLIVAN, S.: *Advanced rail energy storage: Green energy storage for green energy*, *In Storing Energy*, (2016), pp. 69-86, doi: 10.1016/B978-0-12-803440-8.00004-X
- [6] BOLUND, B., BERNHOFF, H., & LEIJON, M.: *Flywheel energy and power storage systems*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, No. 2, (2007), pp. 235-258, doi: 10.1016/j.rser.2005.01.004
- [7] MOORE, SAMUEL K.: *The Ups and Downs of Gravity Energy Storage: Startups are pioneering a radical new alternative to batteries for grid storage*. *IEEE spectrum*, Vol. 58, No. 1, (2020), pp. 38-39, doi: 10.1109/MSPEC.2021.9311456

PÁRHUZAMOS OLDALÚ BORDÁSKÖTÉS GRAFO-ANALITIKUS OPTIMÁLÁSA

GRAPHO-ANALYTIC OPTIMIZATION OF PARALLEL KEY SPLINED SHAFT

*Szabó Ferenc János, PhD, Associate Professor, University of Miskolc,
Institute of Machine- and Product Design, Miskolc-Egyetemváros, Hungary, H3515*

ABSTRACT Splined shafts are used in many drives and rotating elements in engineering practice. Nowadays decreasing the dead-weight of the structures is more and more important (in vehicle industry, aircrafts, etc). This paper shows an optimization process for minimum weight design of parallel key splined shafts. For the solution of the optimization problem a 3D grapho-analytical optimization process is used, based on the Kuhn-Tucker optimality criterium. During the graphic part of the process, three dimensional diagrams show the behaviour of the objective function and of the design constraints, which makes easy to read the optimum solution from the diagram. The final optimum solution is given in a table numerically too.

1. BEVEZETÉS

A retesz- és bordáskötések a hajtástechnikában, autógyártásban, forgó elemek gyártásában jelentős helyet foglalnak el, fontos gépelemeknek számítanak és nagyon sok helyen alkalmazzák ezeket. Napjainkban igen fontos tendencia a különféle elemek, szerkezetek saját tömegének csökkentése, mely az autógyártásban, repülőgépgyártásban nagyon fontos cél. Gyakran a tömegcsökkentés többváltozós optimumszámítást igényel, ami sokszor idő- és számítás-igényes eljárás. Ebben a cikkben egy nagyon egyszerű, de mégis nagyon hasznosnak bizonyuló optimumkereső eljárást mutatunk be, a grafo-analitikus optimálás, mely a Kuhn-Tucker optimalitási kritériumra épül. A rajzos (grapho) és az egyenletrendezéssel történő (analitikus) megoldási mód mindig segíti egymást, ami könnyebbé, gyorsabbá, jobban áttekinthetővé teszi az optimumkeresési probléma szerkezetét. A kétváltozós eseteket (2D optimum) nagyon könnyű ábrázolni és az ábrázolt diagramokon nagyon könnyen leolvasható az optimális megoldás is. Ezek az esetek azonban a kis változószám miatt viszonylag egyszerűek, előbbutóbb felmerül az igény a bonyolultabb esetek kezelésére is. Így alakul ki a háromváltozós (3D optimum) eset, melynek ábrázolása már kissé

bonyolultabb, térbeli diagramok létrehozását igényli. Ha tovább akarjuk a változók számát növelni (pl. 4 vagy több változós optimum), akkor már nem lesz lehetőség az ábrázolásra, vagy nagyon nehézkesé válik, és az analitikus út felértékelődik. Az így definiált optimumkeresési feladatokat külön erre a célra kifejlesztett, többváltozós optimumkereső algoritmusokkal célszerű megoldani, mint pl. az e cikk szerzője által kifejlesztett RVA (Random Virus Algorithm), mely alkalmas nagyobb feladatok, sok változós esetek, multidiszciplináris optimálási feladatok kezelésére is.

A párhuzamos oldalú bordás kötések vizsgálata és optimálása nagyon hasonló a reteszkötés vizsgálatához és optimálásához [1], az eltérést a több, egyszerre működő borda jelenti, mivel figyelembe kell venni az esetleges nem egyenletes terhelés-eloszlást is. A végeeselemes vizsgálatok során ugyanolyan kontakt-törvényeket kell figyelni és betartani, mint a reteszkötések vizsgálata esetén [2]. A kontakt állapot figyelembe vétele a géptervezés több más területén is fontos [3]. A bordás kötések vizsgálatáról kiterjedt irodalom található. Barsoum és Kahn [4] a statikus csavarási szilárdságra végzett optimálást indukciós edzésű bordás tengelyre, geometria és anyag szempontjából. Pedersen [5] kimutatta, milyen nagy mértékben javítható a bordástengely kialakítása a benne fellépő maximális feszültség minimalizálása útján. A tengely fáradási élettartamát 25%-kal javította a maximális feszültségcsökkentésének eredményeként. Tanaka, Fujimoto és Yano [6] a Taguchi módszer alkalmazásával vizsgálta a bordástengely kialakítás optimálásának lehetőségét.

Az optimumkeresés grafo-analitikus módszere a mérnöki gyakorlat számos területén lehet hasznos. Sedulchenko, Saruskis, Kukharets and Zabrodskiy [7] agráripari gépek hajtó kerekeit optimalta grafikus-analitikus optimalással. Hedengren [8] a Karusch-Kuhn-Tucker optimalitási feltételre épülő optimálási tutorialt készített. Postek, Zocca, Gromiko és

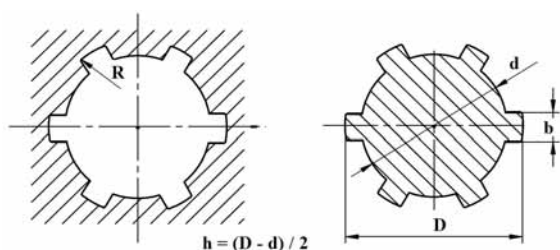
Kantor [9] optimalizációs példákat mutat be Python program-nyelvben. A Kuhn-Tucker optimalitási kritériumok részletesebb leírása Kuhn és Tucker [10], valamint Sundaram Rangarayan [11] cikkében található. A grafoanalitikus optimalizálás előnyeire, hasznára, egyszerűségére és hatékonyságára 2 dimenziós példákat mutat Szabó [12], [13], [14], [15].

Az optimális tervezés napjainkban egyre népszerűbb, hasznosabb és jelentősebb tudományá vált, Vajna [16] munkássága alapján elmondható, hogy ez a holisztikus termékfejlesztési folyamat fontos része.

Jelen cikk két-dimenziós (x_1 és x_2 tervezési változók) és három-dimenziós (x_1 , x_2 és x_3 változók) optimalizációs példát mutat be bordáskötés két-dimenziós és három-dimenziós grafo-analitikus optimalizálására. Többváltozós, bonyolultabb optimalizálásokhoz optimáló algoritmus szükséges, példaként a jelenmunka szerzője által kifejlesztett RVA (Random Virus Algoritmus) is említhető [17].

2. A VIZSGÁLANDÓ SZERKEZET

Bordáskötés optimalizálásához az optimalizáló szerkezet kialakítását az 1. ábra mutatja. A tervezési változók : két változós esetben h és b , azaz a borda keresztmetszetének méretei, három dimenziós esetben pedig a hossz (L) lesz a harmadik változó. A célfüggvény a borda tömege, ennek minimumát keressük. A bordák számát konstansnak tekintjük, ám részletesebb vizsgálatokhoz célszerű lehet az optimalizált többféle bordaszám esetére is elvégezni, és az így adódó eredmények közül a legjobbat kiválasztani. A vizsgálatok során a tengelyátmérőt (d) és a persely átmérőjét (D) konstansnak tekintjük. Az átvindó terhelés a hajtónyomaték, $T = 500$ Nm.



1. ábra. Bordáskötés alkatrészeinek sematikus képe

A jellemző méretek ezekkel az adatokkal már számolhatók:

$$D = d + 2h \quad , \quad r_m = \frac{d_m}{2} \quad , \quad d_m = \frac{D+d}{2} \quad ,(1)$$

A vizsgálathoz alkalmazott bordaszám számítása:

$$z = r_m \pi / b \quad (2)$$

A célfüggvény egy borda tömege, ami a következőképpen számolható:

$$M = hbL\rho \quad [\text{kg}] \quad (3)$$

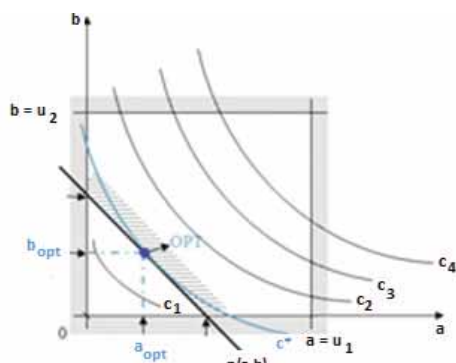
A borda anyagának sűrűségét ρ jelöli. A (3) egyenletben a háromdimenziós esetet láthatjuk, kétdimenziós esetben $m = hb$ [kg/m], azaz a folyóméter-tömeg lesz az optimalizálás célfüggvénye.

A tengely és a bordák anyaga szerkezeti acél, melynek sűrűsége $\rho = 7850$ kg/m³, folyáshatára: $R_{eH} = 800$ MPa.

3. A GRAFO-ANALITIKUS OPTIMALIZÁLÁS BEMUTATÁSA

Jelen cikkb bordáskötés grafo-analitikus optimalizálását mutatja be, kétváltozós és háromváltozós esetben a grafo-analitikus optimalizálás a Kuhn-Tucker-féle optimalitási kritériumra épül, ami azt mondja ki, hogy az optimális megoldás helyén a célfüggvény szintvonala „érinti” a megfelelőségi tartományt.

A célfüggvény szintvonalait úgy lehet ábrázolni, hogy konstanssal tesszük egyenlővé a célfüggvény egyenletét: $f(x_1, x_2) = c$, így a térképészetben alkalmazott szintvonalakhoz hasonlóan, előállnak a célfüggvény szintvonalai, melyeket a változók alkotta koordináta rendszerben ábrázolhatunk. Ha ábrázoljuk a feltételek egyenleteit is, akkor a feltételekben az egyenlőség a határvonal egyenletét adja, és ehhez képest a feltételnek megfelelően a nagyobb, vagy kisebb értékek a megfelelőek. Azon pontok mértani helye, amelyek az összes (explicit és implicit) optimalizációs feltételt kielégítik, a megfelelőségi tartomány (2. ábra).



2. ábra. A megfelelőségi tartomány és a célfüggvény szintvonalai

A 2. ábrán a célfüggvény maximumát keressük, szintvonalait c -vel jelöljük, többféle konstans esetére látható, hogy mikor adódik az érintés a megfelelőségi tartománnyal (c^*). Az ábrán láthatóak az a és b változókra vonatkozó explicit és implicit feltételek határvonalai:

$[u_1, u_2, g(a,b)]$ is, melyek a megfelelőségi tartomány határvonalai. Az érintés szót idézőjelbe tettük, jelezve, hogy a tartomány és a célfüggvény szintvonala közötti érintés többféleképpen is megvalósulhat: lehetséges, hogy a célfüggvény szintvonala a tartomány egyik határvonalát érinti, de lehetséges az is, hogy az érintési pont a tartománynak egyik sarokpontja.

Ha az egyes optimalizációs változókra külön-külön alsó és felső határt írunk elő, akkor ezek lesznek az explicit feltételek: $l_i \leq x_i \leq u_i$, ahol l_i és u_i az alsó és felső határ, $i = 1, 2, \dots, n$ és n az optimalizációs változók száma.

Ha az optimalizációs változókra értelmezett függvényre $g(x_1, x_2)$ írunk elő alsó és felső határokat, amelyből nem lehet kifejezni az egyes változókat, akkor ez implicit feltétel lesz:

$$l_{gj} \leq g(x_1, x_2) \leq u_{gj}, \quad (4)$$

ahol l_g és u_g lesznek a g függvény alsó és felső megengedhető határai, $j = 1, 2, \dots, m$, ahol m az implicit feltételek száma. Az f és a g függvény tetszőleges, nemlineáris függvénye lehet a tervezési változóknak.

3.1. Kétváltozós grafoanalitikus optimalizálás

Kétváltozós esetben az optimumkeresés célfüggvénye a borda folyómétersúlya, azaz $m = hb$ [kg/m], az explicit feltételek a h és b változókra 0 mm alsó határ és 60 mm felső határ, implicit feltételek pedig a megengedhető legnagyobb felületi nyomás (100 MPa) és a megengedhető maximális nyírófeszültség (75 MPa). A fellépő értékek ezeknél:

$$\text{Felületi feszültség: } p = \frac{F}{Lh/2} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

$$\text{Nyírás: } \tau = \frac{F}{Lb} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

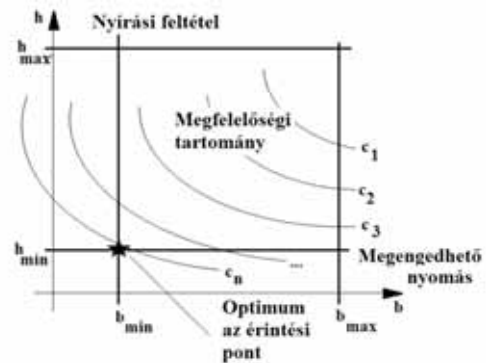
Az (5) és (6) képletekben az F az egy bordára jutó terhelő erőt jelenti, mely a következőképpen számolható:

$$F = \frac{T}{r_m z \theta}, \quad (7)$$

ahol θ a dinamikus hatásokat és az egyenetlen tehereloszlást figyelembe vevő tényező. További implicit feltételt jelent, hogy a fellépő terhelés legyen kisebb, vagy egyenlő a megengedhető maximális terheléssel, ami a felületi nyomásra jelent majd feltételt:

$$T \leq T_{max}, \quad T_{max} = \theta b L r_m z p_{adm} \quad (8)$$

A feltételeket és a célfüggvény szintvonalait a 3. ábrán láthatjuk. A nyírási és a maximális terhelési feltétel a b változóra jelent alsó határt, ezért csak a szigorúbbik lesz aktív.

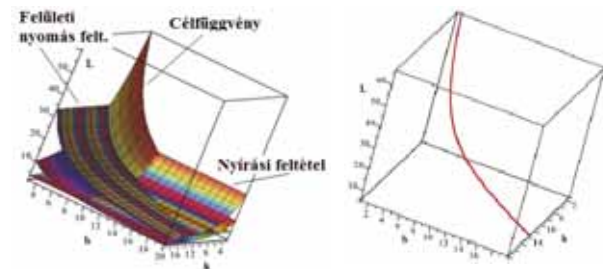


3. ábra. A megfelelőségi tartomány és a célfüggvény szintvonalai (kétdimenziós eset)

3.2. Háromváltozós grafoanalitikus optimalizálás

A háromváltozós esetben a borda méretei mellett a hossz lesz a harmadik változó. Ekkor már nem elegendő két dimenziós ábrázolással bemutatni a feltételeket és a célfüggvény szintvonalait, hanem ezek háromdimenziós felületek lesznek.

A 3. ábrán *-gal jelölt optimális pont helyett egy térgörbe fogja mutatni az optimális megoldást, a különböző hossz értékekre. A 4. ábra mutatja a felületek és a megoldás térgörbéjének három dimenziós ábrázolását. Az optimalizálás numerikus eredményei az 1. táblázatban találhatóak.



4. ábra. A felületek és a megoldás térgörbéjének 3D képe

1. táblázat. Az optimumkeresés számszerű eredményei

h [mm]	b [mm]	L [mm]	M [g]
4	2.667	50	4.19
6.667	4.445	30	6.97
10	6.667	20	10.47

Habár a megtakarítható anyagmennyiség jelentéktelennek látszik, az optimumszámítás eredményeinek alkalmazása a reteszkötés kialakításának megtervezésében akár oda is vezethet, hogy a vonatkozó szabványok, tervezési ajánlások újragondolása, „finomhangolása” is lehetségessé válhat.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikk kétváltozós és három változós grafo-analitikus optimalizálást mutat be, bordáskötések optimalizálásához.

Kétváltozós esetben az optimalizálás célfüggvénye és a feltételek (implicit és explicit feltételek) könnyen ábrázolhatók kétdimenziós ábrákra és az optimális megoldás egyértelműen leolvasható az érintési pont koordinátái alapján.

Háromváltozós esetben azonban a feltételek és a célfüggvény háromdimenziós felületek, melyeket háromdimenziós koordináta-rendszerben kell ábrázolni. A kétdimenziós eset könnyen leolvasható optimális megoldási pontja helyett a háromdimenziós esetben az optimális megoldás egy térgörbéként adódik, melynek minden egyes pontja egy kétváltozós optimum, a harmadik változó különböző értékeihez tartozóan.

Ez a tény nagyon izgalmassá teszi a további, jövőbeli vizsgálatok eredményeinek becslhetőségét, hiszen a négyváltozós eset megoldása egy felület lehet. Az eredményeket ábrákra és egy táblázatban mutatjuk be.

5 IRODALOM

- [1] M. K. Sahu, Pardeep, Optimization of the Keyway Design with Consideration of Effect of Stress Concentration on Different Materials, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 3, n. 5, ISSN 2278-0181, May 2014.
- [2] K. Váradi, D. M. Verghese, Contact State and Stress Analysis in a Key Joint by FEM, *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.*, Vol. 36, n. 1, pp. 45-60, 1992.
- [3] F. Sarka, Examination of Bolt Connection with Finite Elements. *Lecture Notes in Mechanical Engineering, Vehicle and Automotive Engineering*, 4 pp. 212-222. , 11 p. 2022
- [4] I. Barsoum, F. Khan, Strength Optimization of Induction Hardened Splined Shaft – Material and Geometric Aspects, *International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering*, 6, 2012 January, 4 p.
- [5] L. N. Pedersen, Optimization of Straight-Sided Spline Design, *Archives of Applied Mechanics*, 8 1 (10) pp 1393 – 1407, DOI : 10.1007/s00419-010-0493-9
- [6] T. Tanaka, R.Fujimoto , H.Yano, Optimization of Shaft Spline Projection Design, *Journal of Engineering Society*, 2002, Vol 10, issue 3, pp 80 -84. https://doi.org/10.18890/qes.10.3_80
- [7] B. Seludchenko, E. Saruskis, S. Kukharets, A Zabrodskyi, *Graphic Analytical Optimization of Design and Operating Parameters of Tires for Drive Wheels of Agricultural Machinery, Soil and Tillage Research*, Vol 215, January 2022, 105227 <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105227>
- [8] J. Hedengren, Design-Optimization using Karush-Kuhn-Tucker Conditions, <https://apmonitor.com/me575/index.php/Main/KuhnTucker>
- [9] K. Postek, A. Zocca, J. Gromiko, J. Kantor, *Data- Driven Mathematical Optimization in Python*, 2023. <https://mobook.github.io/MObook/intro.html>
- [10] H. W. Kuhn, A. W. Tucker, Nonlinear Programming, in: *Proceedings of the 2nd Berkeley Symposium, Berkeley*, University of California Press, pp. 481-492. MR 0047303.
- [11] Sundaram, K. Rangarajan, Inequality Constraints and the Theorem of Kuhn and Tucker, *A First Course in Optimization Theory*. New York, Cambridge University Press, pp. 145- 171. ISBN 0-521-49770-1
- [12] J. F. Szabó, Multidisciplinary Optimization During Gear Design, In J. Herskovits, S. Mazonche, A. Canlas (Ed.), *6th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, (WCSMO-6)*, 4 Reston VA, USA, International Society of Structural and Multidisciplinary Optimization (ISSMO), pp 74-85, 2005.
- [13] J. F. Szabó, Grapho-analytical Optimization of Cylindrical Spring (in Hungarian), *GÉP*, Vol. 68, n. 4, pp 69-72, 2017.
- [14] J. F. Szabó, Optimization of Springs Applied in Vehicle Suspension Structure, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2018, pp. 85-596., 12 p.
- [15] J. F. Szabó, Optimization Possibilities of Shaft-Bearing Systems, Part II: Optimization for Minimum Mass, (in Hungarian), *GÉP*, Vol. 70, n. 3, pp. 66-79, 2019.
- [16] S. Vajna, (editor): *Integrated Design Engineering. Interdisciplinary and holistic product development*. Ist edition, Springer Nature, Switzerland. 2020.
- [17] J. F. Szabó, Multidisciplinary Optimization of Journal Bearings, using an RVA Evolutionary Type Optimization Algorithm. *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 13, No 7., pp 181-195, 15 p. 2016 , ISSN 17858860. http://acta.uni-obuda.hu/Szabo_71.pdf

RÁCSOS HÍDVÁZ REZGÉSEINEK VÉGESELEMES VIZSGÁLATA TERHELT ÁLLAPOTBAN

VIBRATION ANALYSIS OF A BRIDGE FRAME SUBJECTED TO LOADS USING FINITE ELEMENT ANALYSIS

Szirbik Sándor, PhD, Virág Zoltán, PhD

ABSTRACT: This paper deals with the modal analysis of a 3D bridge frame subjected to loadings due to the moving belt resting on conveyor idler rolls, the underlying conveyor belt support frame, and the transported materials to be moved during full-capacity transport. The structure is reused to assist the path of the conveyor belt in the work area. The steel bridge frame, which consists of various structural steel beams, is modeled as a 3D frame using beam elements and various profiles. The purpose of finite element analysis is to provide a starting point for studies of the transient forced vibrations with the results of modal analysis.

1. BEVEZETÉS

A szállítószalagpályák vezetésére szolgáló hídváz szerkezetek ellenőrzése összetett feladat, főleg, ha ezt egy más jellegű anyagszállításra méretezett, korábban már használt és radikálisan átalakított szerkezetre kell megtenni. Szilárdságtani számítások és nyomott rudak kihajlásának ellenőrzésével egy ilyen szerkezetre közöl eredményeket az [1] és [2] munka, melyekben leegyszerűsítve, síkbeli rácsos tartóként kezelve, végeselemes számításokból nyert paraméterek felhasználásával, és döntően kézi számításokkal került ellenőrzésre a szerkezet. A szerkezet térbeli vázszerkezetként tovább vizsgálható a rezgéstani tulajdonságokat is beleértve.

A sajátfrekvenciák és vonatkozó rezgések felhasználhatók dinamikus terhelések szerkezetre gyakorolt hatásainak vizsgálatára, mint például tranziens rezgések elemzése stb. A modal analízist, a sajátértékfeladatok megoldását a numerikusan pontosabban elvégezhető sajátérték-számítással érdemes kezdeni, majd a sajátértékekhez tartozó rezgések előállításával folytatni. A szerkezetek sajátértékfeladatainak numerikus megoldására szolgáló bevett eljárás az altér iteráció és a Lánczos-módszer. Ezek közül, ha a rezgéstani feladat szabadságfoka nagy, vagy a feladat jellege ezt indokolja, akkor a numerikusan általában hatékonyabb Lánczos-módszer választása

célravezetőbb a szoftverek nyújtotta választási lehetőségek közül [3, 4], ahol a megoldás részeként a sajátrezgések képi megjelenítésén a maximális elmozdulás helye a színskálán általában piros színnel jelölt, nagysága pedig egységnyinek választott.

E számítások jelentősége a gerjesztésnek kitett szerkezetek esetén a sajátfrekvenciák valamelyikével egybeeső gerjesztési frekvencia okozta rezonanciakatasztrófa megelőzésében van, mivel az a valós szerkezet esetén általában a leggyengébb alkotórészek törésében jelentkezik, gátolva így a szerkezet üzemszerű működését. A rezonanciakatasztrófa lehetséges veszélyei miatt különféle ipari területeken végeznek is erre vizsgálatokat, pl. bányákban alkalmazott kotrógépeknél és szállítószalagoknál [5, 6, 7]. A szerkezetek károsodásai, vagy a tervezett paramétereiktől eltérő megvalósításuk a sajátfrekvenciák olyan változását eredményezik, amely kedvezőtlen lehet.

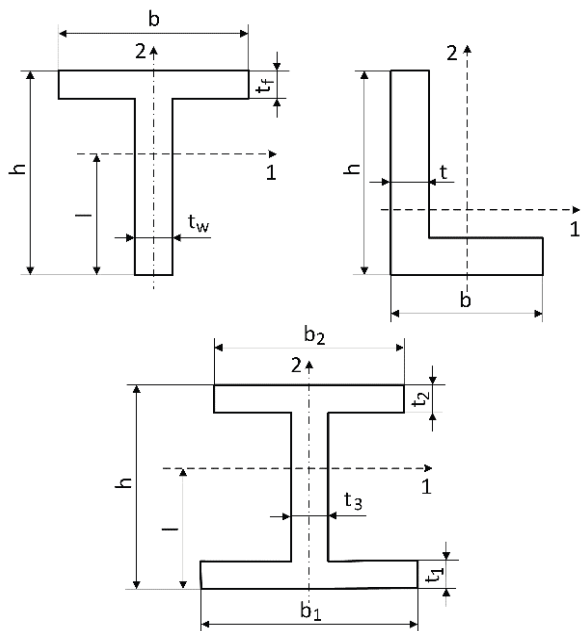
A vizsgált hídszerkezet, a beépíteni kívánt szállítószalag vázelemekkel együtt a szalag mozgásából származó transzverzális rezgéseknek kitett, továbbá a szállítószalag görgők elhasználódásából és tönkremeneteléből származó hatások is gerjeszthetők. A szerkezet sajátfrekvenciáinak ismerete ezen hatások kézbe tartásának legfontosabb része. A hídváz szerkezetet alkotó karcsú rudak sajátfrekvenciái eleve alacsonyak, így az ilyen szerkezet könnyen gerjeszthető és mindezek miatt rendszeres felügyeletet kíván.

2. RÁCSOS HÍDVÁZ SZERKEZETI KIALAKÍTÁSA ÉS TERHELÉSI ESETEI

A vizsgált szerkezet egy olyan szalaghíd, amely a külszíni bányaművelés során többször is felhasználásra került már a meddő és a lignit elszállításának lebonyolításánál, és a szállítópályák szintbeli találkozásának elkerülésében nyújt segítséget. A rácsos szerkezet többszöri átépítés és megerősítés után nyerte el vizsgált alakját, amely a fejlesztések során aszimmetrikus kialakításúvá vált. A 23 m hosszúságú, 3 m széles és 2,3 m magas főbb méretekkel bíró szerkezet geometriai modellje tíz azonos hosszúságú cellából áll. Ezekben az átlós irányú keresztartók beépítésének iránya egymásra

merőleges, de a cellák elrendezése nem szimmetrikus, mint ahogy az az esetek többségében megszokott, így hat cellában azonos, míg a másik négyen ellentétes a keresztmerezítők állása, mint az kivehető a 2. ábrán is. A szerkezetre alulra és felülre szélfogó rácsok is kerültek.

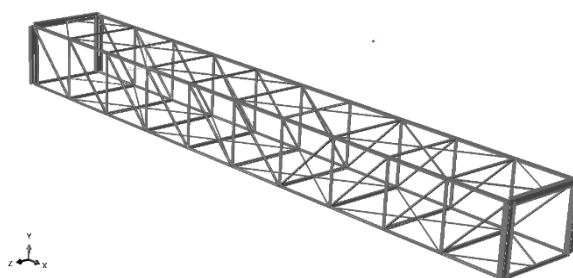
A választott keresztmetszetek geometriai méreteinek megadása az 1. ábrán látható betűjelekhez rendelt számokkal történik. Az alsó kereszttartók I keresztmetszetű ($b_1 = b_2 = 100$ mm, $h = 100$ mm, $t_1 = t_2 = 8$ mm, $t_3 = 16$ mm), a felső kereszttartók T profilú ($b = 110$ mm, $h = 75$ mm, $t_f = 7$ mm, $t_w = 14$ mm) rudak. Az alsó és felső hossztartók esetén a végeelemes analízis során T alakú profilok $b = 150$ mm, $h = 75$ mm, $t_f = 8$ mm, $t_w = 16$ mm, illetve $b = 200$ mm, $h = 100$ mm, $t_f = 10$ mm, $t_w = 20$ mm méretekkkel rendeltek az alkalmazott rúdelemekhez. A két kapukeret I szerkezeti acélból készül felső gerendája $b_1 = b_2 = 220$ mm, $h = 200$ mm, $t_1 = t_2 = t_3 = 10$ mm méretű, míg a kapuk oszlopainál csupán $h = 315$ mm méretben változik az I gerenda. A szélfogó rácsok L profilokból ($b = 50$ mm, $h = 50$ mm, $t = 6$ mm) kerültek kialakításra. A szerkezet oszlopai összetettebb keresztmetszettel bírnak, ezért ezeket a beépített profilok közül választott téglalapkeresztzettel ($b = 127,08$ mm, $h = 23,43$ mm) helyettesítettük, mert a végeelemes program beépített rúdelem profilok, mint T, L, U stb. profilok és alapsík-idomokkal, úgymint négyzet és kör lap választása mellett



1. ábra. Rácsos hídvezhöz alkalmazott szerkezeti acélok rúdelemekhez rendelt profiljai.

szolgáltatót feszültség számítást a rúdelemek tekintetében. Az 1. ábrán berajzolt 1 és 2 jelű tengelyek a profilok rúdelemekhez rendelését, orientációját biztosítják.

A szalaghíd mindkét végén, a szélső kapuk jelentős mértékben megerősítettek, ezek a többi elemhez képest jóval masszívabb I gerendákból állnak. A számításokból kiderül, hogy a szerkezet robusztusságát ezek alapvetően javítják, mind szilárdságtani, mind rezgéstani szempontból. A hossztartók néhány szakaszára a korábbi felhasználásokból adódó merevítések kerültek, de ezeket nem modelleztük, így a hossztartók mentén a rúdelemek azonos profilúak a háromdimenziós szerkezeti modellen, ahogy a szerkezet időjárási körülményekből adódó károsodásait, rozsdásodását is figyelmen kívül hagytuk, mivel nem tekintettük őket jelentős mértékűnek.



2. ábra. Rácsos hídszerkezet geometriai modellje.

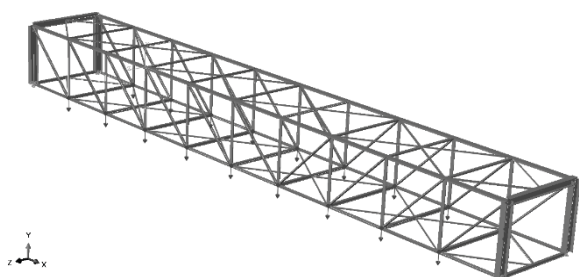
A szállítandó anyag megváltozása és a szállítópályák radikális átalakítása a szalaghíd teherbírásának, szilárdságtani ellenőrzésének kérdéseit Ladányi [1] munkája részletesen ismerteti, amely egy kétdimenziós modell vizsgálatán keresztül valósult meg. Az általunk vizsgált térbeli, 2. ábrán látható szerkezet ezek eredményeit jól alátámasztják.

A szerkezet háromdimenziós modellje a valós szerkezetet alkotó többféle keresztmetszetű szerkezeti acél méretpontos bevitelével, illetve ahol a profil összetett geometriával bírt, például az oszlopoknál, velük azonos geometriai jellemzőkkel bíró általános keresztmetszet felvételével készült.

Az acélminőségre jellemző szokásos $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa értékű Young modulus, a $\nu = 0,25$ Poisson-szám, valamint a $\rho = 7,85 \cdot 10^{-9}$ t / mm³ sűrűség, mint számításokhoz szükséges anyagjellemzők lettek figyelembe véve. A végeelemes számítások alapján, az elkészített geometriai modell és a sűrűség segítségével, a szerkezet tömegét 6,2 tonnában állapítottuk meg.

A megtámasztásokat is egyszerűsített módon a hídszerkezet négy alsó sarokpontjában írtuk elő oly módon, hogy azok gátolják a szerkezet térbeli merevtestszerű mozgását, de ne okozzanak befeszülést két támasztási pont között. Az egyik támasztási pontban így egy térbeli csuklós támasz,

míg a másik három sarokpontban térbeli görgős támasz definiált.



3. ábra. Rácsos hídszerkezet végeelemes modelljén előírt terhelések.

Vizsgálataink során megkülönböztettünk három terhelési esetet, amelyek közül az A jelű az az eset, amikor nincs terhelve a térbeli rácsos szerkezet, azaz nincs még beépítve a szállítópálya.

A szállított anyag tömegének kiszámítása laza halmazsűrűség esetén $\rho_h = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ t} / \text{mm}^3$ értékkel, és az [1] munkában ismertetett anyagkeresztmetszettel történt. A szállítószalagra szállítás közben ható terhelések mérésrel vagy szimulációkkal is megállapíthatók az ömlesztett szilárd anyag és a szalag megereszkedési arányai alapján [5], és ezáltal a szállító görgőkre ható terhelésen keresztül a vázszerkezet anyagszállításból adódó terhelése is. A szállító görgők állapotfelügyelete pedig már akusztikus szenzorokkal is megoldható [6].

A második, B jelű terhelési esetben az [1] munka alapján már folytonos üzemnél fellépő, így állandónak tekintett terhelést vettünk figyelembe, ahol a szállítandó meddőkőzet és a szállítószalag, valamint a hozzátartozó vázelemek súlyát osztottuk szét egyenlően az alsó hossztartókon. A laza sűrűségű anyagtömeggel számolva a terhelést a szerkezet alsó keresztartók csatlakozási pontjaiban téve, a terhelésszétoosztás a tartószerkezet támaszok közé eső, kilenc-kilenc csatlakozási pontban elhelyezett 15 kN-os erőkkel valósult meg, így írva elő az összesen 270 kN terhelést a 3. ábrán láthatóan, kis lefelé mutató vektorokkal bejelölt módon.

Vizsgáltunk egy C terhelési esetet is, mert a beépíteni kívánt szállítószalag vázelemek teljes szélessége kizárja azt, hogy mellette a rácsos szerkezetben belül, a felügyeletet biztosító járda kialakításra kerüljön, mert a szalaghíd oldalsó síkjainak távolsága elfoglalja a hídszerkezet szélességét. Így a megközelíthetőség biztosításának megoldása, ha a szerkezet egyik oldalán, konzolos tartókra helyezve alakítanak ki egy járdát. Ez a felépítés bevált már a bányában üzemelő munkagépeken is, mint például marótárcsás és merítéklétrás kotrók, hányóképzők stb. A rácsos szerkezetre

konzolosan telepített járda tömege miatt modelünkre a B jelű állapothoz képest némi többletsúly adódik. Ezt a C számítási verzióban úgy kezeljük, hogy az egyik oldalon található kilenc terhelési pontnál megnöveltük az alkalmazott részerők nagyságát 1,5 kN mértékben. Tehát ebben az esetben az egyik oldalon egyenletesen szétoosztott 148,5 kN erőt működtettünk, a másikon pedig továbbra is 135 kN-t. Így a fellépő aszimmetrikus terhelés a szilárdságtani vizsgálatokban a háromdimenziós szerkezetre már csavaró igénybevétel is kifejt amellett, hogy a terhelés kismértékű növekedését is okozza. A szilárdsági számítások eredményeiben ez nem jelentet nagymértékű változást. Azt tapasztaltuk, hogy a hídváz a statikus terhelésekre kapott tényleges biztonsági tényezője mind három terhelési esetben meghaladta az $n = 3$ értéket és lehajlásának legnagyobb mértéke hídközépen csak 21,6 mm-nek adódott.

3. VÉGESELEMES ANALÍZIS

A numerikus mechanika végeelem-módszere a vázszerkezet pontos geometriai modelljének egyszerű geometriájú, elegendő számú kicsiny elemre történő felosztásán alapul. A gyakorlatban jól használható végeelemes elemcsaládok két végpontú, közöttük a mezőket jól közelítő interpolációkkal bíró elemeket tartalmaznak. A szerkezet modelljében az egyes végeelemek a valóságos kapcsolódásoknak megfelelően illeszkednek egymáshoz az elemek határain kijelölt csomópontokban tett, illetve az illeszkedő csomópontok elmozdulásaiban történő előírások felhasználásával. Hajlítottnyírt rúdelemeket lineáris approximáció választása mellett alkalmazva a kijelölt rezgéstani feladatok jól kezelhetők, mert az elméleti háttérrel tekintve jól kidolgozott és gyakorlati problémák megoldásában [4] is jól használható, megbízható eszköz.

A rácsos hídszerkezet rezgéstani vizsgálati során a felterhelt esetekben a frekvenciaszámítások csak egymást követő két lépésben végezhetőek el. Első lépésben kerül sor az alkalmazott terheléssel a rugalmas alakváltozást szenvedő szerkezet deformált alakjának meghatározására. Ezt a lépést az NIgeom beállítása határozza meg, így az Abaqus figyelembe veszi a geometriai nemlinearitást a terhelt alak kiszámításában és áttudja a deformált alakot adni a következő lépésben végzett lineáris perturbációnak. Az első lépésnek alárendelt második lépésben kerül sor a terhelt alak geometriáján a sajátértékek kinyerésére. A dinamikai és rezgéstani és az NIgeom beállítást használó feladatokban a lineáris approximációt alkalmazó végeelemek használata mindig célravezetőbb. A meghatározott és növekvő sorrendbe állított első néhány domináns sajátfrekvenciához tartozó rez-

géskép ezután kerül meghatározásra, mert bizonyítható módon a sajátfrekvenciák mindig pontosabban számíthatók, mint a rezgéseképek és így a frekvenciákból számított sajátrezgéseképek lesznek pontosabbak. A megoldások a geometriától és az anyagminőségtől függenek, melyeket az alkalmazott alátámasztás döntően befolyásol. A rezgéseképek felhasználhatók később a gerjesztett szerkezet viselkedésének modellezésére.

4. EREDMÉNYEK

A szerkezet előbbieik alapján felépített végeselemes modelljével, benne lineáris végeselemekkel és az egyszerűség végett csillapításmentes esettel nyert, növekvő sorrendbe állított sajátfrekvenciáit az 1. táblázat foglalja össze az A, B és C terhelési esetekre. Az eredményekből kitűnik, hogy a szerkezet alapvetően már kis frekvencián rezgésbe hozható, amelyet a karcsú rudak alkalmazása eredményez. A szerkezet felterhelésnek kitett, de ez a rezgéseket kis mértékben befolyásolja, mert a főteherviselő elemek az alsó hosszartók középső részei, illetve a kapuknál lévő első keresztmerevítők [8], így megállapítható, hogy a vizsgált terhelések nem hangolják el a szerkezetet, csak kismértékben módosítják a frekvenciaértékeket, mert a legtöbb rúdelem előfeszítése csak kismértékben változott.

1. táblázat. A sajátfrekvenciák értékei [Hz] az A, B és C jelű terhelési esetekben.

Modus sorszám	Terhelési eset		
	A	B	C
1.	7,727	7,702	7,701
2.	9,285	9,285	9,284
3.	10,095	10,146	10,149
4.	14,480	14,477	14,476
5.	14,738	14,560	14,548
6.	16,004	15,405	15,361

A rezgéstani modellen végzett számításokból természetesen további sajátfrekvenciák is kinyerhetők, de azok már nem szükségesek a további lépéshez, mert az első néhány rezgés a domináns. A sajátfrekvenciákhoz tartozó sajátrezgéseképek pedig a végeselemes analízis eredményei között megtalálhatók.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A háromdimenziós modellen végzett numerikus szimulációk megerősítik a kétdimenziós modellen végzett számításokból levont következtetéseket, de ki is egészítik azokat a deformált alakok pontosabb meghatározásának lehetőségével és a rezgéstani vizsgálatokkal, amelyek szintén szükségesek a rácsos hídszerkezetre telepített szállítószalagpálya üzemeltetésbiztonságának előzetes el-

lenőrzésében. Az előfeszített szerkezetként számolt és állandósuló üzemből származtatott egyenletesen szétosztott terhelésekkel támadott acélszerkezet sajátfrekvenciái kerültek meghatározásra. A terhelési esetek frekvenciái közötti minimális eltérést a szerkezet végein kialakított, megerősített kapuk szerkezetre gyakorolt hatásával, továbbá a szerkezetet alkotó rudak karcsúságával és azok többségénél az előfeszítés megváltozására minimális hatást gyakorló terheléskiosztással indokoljuk. A szállítószalag mozgásából és a görgők elhasználódásából származó, hídvázra ható gerjesztett rezgések vizsgálata nem kerülhető meg, mert a frekvenciák egybeesése kerülendő és ennek vizsgálatához ad kiindulást a modálanalízis elvégzése.

6. IRODALOM

- [1] Ladányi G.: *Rácsos szalaghíd szilárdsági ellenőrzése*, Bányászati és Kohászati Lapok – Bányászat – Kőolaj És Földgáz, 151 (1-2), pp. 2-5. 2018.
- [2] Ladányi G.: *Strength assessment of a truss bridge for belt conveyors*, Annals of the University of Petroșani, Mechanical Engineering, 19, pp. 91–96. 2018.
- [3] Abaqus 6.13 online documentation, Dassault Systems, 2015.
- [4] Bathe, K. J.: *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall Inc.: Englewood Cliffs, NJ, USA, 1996.
- [5] Ilic D., Wheeler, C.: *Measurement and simulation of the bulk solid load on a conveyor belt during transportation*, Powder Technology, 307, pp. 190-202. 2017.
- [6] Wijaya, H., Rajeev, P., Gad, E., Vivekanantham, R.: *Automatic fault detection system for mining conveyor using distributed acoustic sensor*, Measurement, 187, 110330, 2022.
- [7] Popescu, F. D., Radu, S. M., Andras, A., Brînas, I., Marita M. O., Rebedea, N. I.: *The modal analysis, using simulation and modelling, of the boom of the ERC-1400 Bucket Wheel Excavator during operation*, Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering, 63 (4), pp. 353-362. 2020.
- [8] Szirbik S., Virág Z.: *Finite element analysis of a steel bridge frame for belt conveyors*, Geosciences and Engineering, 11 (1), 2023.

FENNTARTHATÓ TERMÉK ÉS SZOLGÁLTATÁS FEJLESZTÉS A NAPELEMES LEFEDÉSEKNÉL

Környezetvédelmi terméknnyilatkozat (EPD) szerinti termék tervezés
és a felhasználók ESG fenntarthatóság fejlesztési lehetőségeinek javítása

SUSTAINABLE PRODUCT AND SERVICE DEVELOPMENT FOR SOLAR PANEL COVERINGS

Designing products according to Environmental Product Declarations (EPD)
and improving users' ESG sustainability development opportunities)

Borbás Ferenc mérnök-közgazdász, solarporttech.com

A terméktervezés ma már egy nagyon bonyolult feladat főleg akkor, ha a termékkel a lehető leggyorsabban ki akarunk lépni a piacra. Különös tekintettel a fenntarthatóság és az EPD szerinti tervezés figyelembevételével. Ahhoz, hogy elkezdjük a munkát meg kell határozzuk, hogy milyen erőforrásokra van szükségünk. Az erőforrás kialakítás mixét a célok határozzák meg. Esetünkben az autóbeállók, carportok, nagy méretű napelemes lefedési szerkezetek és a hozzájuk kialakítandó szolgáltatási környezet létrehozása volt az első cél, amelyet folyamatosan finomítottunk.

A célok egy mondatban: Biztonságos, Fenntartható, ESG kompatibilis, fejleszthető, nagy áramhasználati rendszerekbe illeszthető kiépítés létrehozása.

Az elején kitűzött fő célok: környezetbe illeszthető design, átgondolt telepíthetőség és logisztika, energiaköltségek csökkentése, járművédelem, energiafüggetlenség növelése, jármű töltés, digitális rendszer szervezés, CO2 megtakarítás, zöldnövényzet elhelyezés, esővíz felfogás, finanszírozhatóság.

A célok megvalósításához rendeltük az erőforrásokat, eszközöket.

Szakterületek, akik részt vettek a tervezésben: human tanácsadók, építész tervező, energetikus, várostervező, statikus tervező, növényorvos, elektromos tervező, logisztikus, ipari formatervező, műszaki tervező, gyártástechnológus, szoftverfejlesztő, logisztikus.

Számos megújuló energetikai, energiatárolási,

szakmai szervezetbe is beléptünk, azért, hogy naprakészek legyünk.

Modern fejlesztési elvek, rendszerek alkalmazása: Design Thinking, Lean Startup, Business-Modell-Canvas, Agilis Scrum módszer. A fenti szakterületeket ezekbe a csoportmunkákba szerveztük a hatékony munka érdekében.

Rendszerbe szervezett eszközök kiválasztása: inverterek, terhelés-kapcsolók, terheléelosztók, intelligens szoftverek, minőségi alkatrészek. A megfelelő hardware és szoftver összehangolása révén az energetikában is komoly eredmények érhetők el. Lakossági és ipari szinten is érdemes olyan újszerű működési logikák létrehozása, amelyek kiegészítik a már meglévő jó gyakorlatokat.

Modern szoftverekkel támogatott tervezés: Autodesk Architecture Engeenering, Autodesk Product Design, Docs for AEC collection, Statikai méretezés, viharszimuláció. Konkrét mérnöki munka segítségével a fenti szoftverek nélkül nehezen lehet boldogulni, azonban a tervezési irányok mindenképpen a fő célokból kell, hogy levezethetők legyenek.

A fenti erőforrások és módszerek segítségével jöttek létre az eredményeink, amelyek már első körben alkalmasak arra, hogy piacra lehessen lépni a termékcsoportokkal. Ugyanis a piacot szét kellett szednünk, mert az elemzéseink azt mutatták, hogy hatékonyabban tudunk kommunikálni velük, illetve az elérendő célok is ezt indokolták.

Két szegmenst hoztunk létre: lakossági, kkv szegmens, közterületi, ipari és mezőgazdasági lefedési szegmens.

Céljaink tükrében az eredmények az alábbiak:

Zöldnövényzet elhelyezési lehetőségek: víztartály az oldalán, gabion a tetején, függeszthető virágtartók, növényport kialakításán.

Esővíz tárolási megoldások: integrált álló földfeletti víztartályok, növény-felfutási lehetőséggel, különálló földfeletti tartályok, földalatti vízvezetés, tartályok.

Dizájn, skálázhatóság: egyeztetett, egységes statika és dizájn, skálázható mérettípus és elektromos teljesítmény. A tervezés egyik kritikus pontja volt az, hogy olyan statikát tudjunk létrehozni, amely esztétikai élményt is tud nyújtani. Illetve ezt össze kellett hangolnunk a napelem méretekkel, azért, hogy egy teljes beruházás végén a watt peak/euró árunk jó érték legyen.



Európai műszaki, statikai biztonság: ISO 9001, ISO 14001 felügyelt gyártás, viharállóság. Megvizsgáltuk, hogy miért nem haladnak az importból származó carportok, autóbeállók eladásai.

Azt láttuk, hogy a fenti biztonsági kérdések nagyon fontosak a vevők számára, ezért ennek is a fejlesztésünk eredményének kellett lennie.

Jármű elektromos töltésű infrastruktúra kiépítése: járdasziget létrehozás, védőkorlát, POS kihelyezés, töltési csatlakozási pont kiépítés.

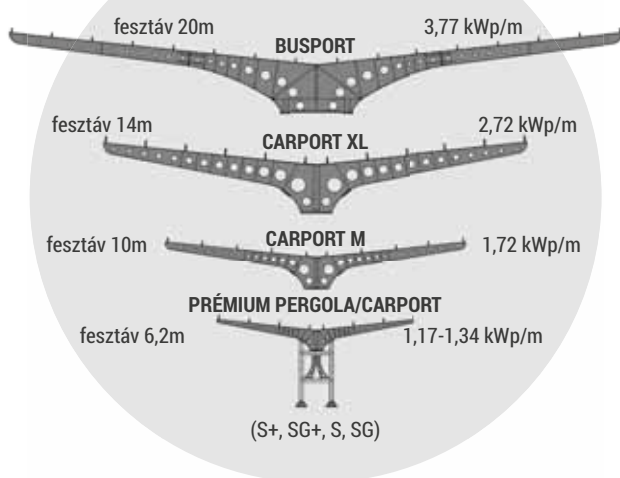
A lakossági, kkv esetben is fejleszteni kellett eszközöket, amelyek gátolják a felszerelhetőséget, elhelyezést. Nagy teljesítményű töltőknél különböző aléptípusok, hálózat kiépítési segédelemek mellett a mechanikai eszközök, védőkorlátok, reklámelhelyezési lehetőségek problémáit is meg kellett oldani. Busz és teherautó töltési szisztémák nagy mennyiségű jármű esetén új kihívásokat képeznek.

Kiszállítás, telepíthetőség: S és S+ típusok kiszállításakor a raklapok targoncával mozgathatók, helyszínen az alkatrészek kézi erővel mozgathatók, összeállíthatók, felszerelhetők. Helyszíni kisdaru (teherbírás 1 t-ig) előny.

Pénzügyi finanszírozhatóság, lízing: a gabion súlyozás és az Energy Management Box könnyű áthelyezhetősége miatt tervezhető értékcsökkent visszavásárlási lehetőség. Nagy projekteknél PPA, ESCO lehetőségek.

A fejlesztés végeredménye egy mondatban: Az energiatermelést a fogyasztást digitális hálózatba szervezzük, szoftveresen hatásfokot javítunk, növeljük a zöld felületeket, esővizet tartunk meg, élhető környezetet teremtünk.

Műszaki alapadatok



Energy Management Box létrehozása: inverter, akkumulátor, AC, DC védelmek, intelligens távoli vezérlés, karbantartás, villámvédelmek, kommunikációs modul, visszawatt védelem, telephelyi előszerelés.

Ennek az eszköznek a bevezetése kulcskérdésnek bizonyult. Úgy a pénzügyi finanszírozás, mint a rövidesen létrejövő energiaközösségi kommunikáció és az energiátároló rendszerek elterjedése szempontjából.

CONTENTS

1. <i>Alireza Aghakhani, Dr. Ágnes Takács:</i> BIOMIMETIC DESIGN THINKING: INTEGRATING NATURE'S STRATEGIES INTO THE DESIGN PROCESS	5	16. <i>Dr. Péter Ficzere, Noémi László:</i> ANALYSIS OF SEM IMAGES USED TO INVESTIGATE THE EFFECT OF IRONING PARAMETERS BY CAD SOFTWARE	69
2. <i>Judit Albert, Dr. Ágnes Takács:</i> ADDITIVE MANUFACTURING WITH BIOMIMETIC APPROACH	9	17. <i>Sahm alden Abd al al, Mariann Fodorné Cserépi, Dr. Marcell Gáspár, Dr. Ákos Meilinger:</i> RESISTANCE SPOT WELDING AND DISSIMILAR JOINING OF AUTOMOTIVE HIGH-STRENGTH STEELS AND ALUMINIUM ALLOYS	73
3. <i>Sándor Apáti, Dr. György Hegedűs:</i> CONCEPTUAL DESIGN OF JIG SAW TEST BENCH	13	18. <i>Dr. Viktor Gotthard:</i> BRAND NEW DIRECTIONS OF DESIGN FOR X	77
4. <i>Angadi Basettappa Vishalakshi, Dr. Péter Bencs:</i> SOLUTION OF JOULE THOMSON EFFECT FOR GAS PRES-SURE REGULATOR STATIONS	17	19. <i>Dr. György Hegedűs:</i> MACHINING WITH LONG EXTENDED TOOLS	81
5. <i>Kolkar Nanjappa Sneha, Nóra Nagy, Dr. Péter Bencs:</i> HYDROGEN MIXING WITH NATURAL GAS - RISK ASSESSMENT	21	20. <i>Hussein Alzyod, Dr. Péter Ficzere, Dr. Lajos Borbás:</i> THERMAL ANALYSIS OF FDM PROCESS PARAMETERS AND THEIR EFFECTS ON RESIDUAL STRESS	85
6. <i>István Besenyey, Dr. Zoltán Bihari:</i> THE LOAD-BEARING CAPACITY OF THE CENTRAL HOLE OF AN ALUMINIUM PROFILE FOR MECHANICAL ENGINEERING	25	21. <i>Dr. Károly Jálícs:</i> FAILURE ANALYSIS OF FLYWHEEL RETAINING BOLTS	89
7. <i>Dr. Zoltán Bihari:</i> PAST, PRESENT AND FUTURE OF TEACHING TECHNICAL COMMUNICATION	29	22. <i>Dr. Andrea Keszi- Szeremlei, Dr. Ferenc Nádasdi:</i> DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES USING THE VALUE METHODOLOGY	93
8. <i>Eszter Borsodi, Dr. Ágnes Takács:</i> DEVELOPMENT OF A DESIGN METHOD FOR CIRCULAR MANUFACTURING	33	23. <i>Noémi László, Dr. Péter Ficzere:</i> POSSIBILITIES OF COLD PLASMA SURFACE MODIFICATION FOR VEHICLE INDUSTRY APPLICATIONS MANUFACTURED WITH ADDITIVE TECHNOLOGIES	97
9. <i>Péter Csvila, Dr. Tibor Czigány:</i> MANUFACTURING OF CARBON-BASED CONDUCTIVE STRUCTURAL COMPOSITES AND ANALYSING THEIR PROPERTIES	39	24. <i>Balázs Kriston J., Dr. Károly Jálícs:</i> POSSIBILITY OF INVESTIGATING VEHICLE FAILURES WITH THE TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA) METHOD	102
10. <i>Attila Bús, Péter Demeter:</i> DEVELOPMENT OF CUSTOM DIAGNOSTIC ADAPTERS FOR DIFFERENT AUTOMOTIVE APPLICATIONS THROUGH THE PRINCIPLES OF THE PRODUCT DEVELOPMENT METHOD	45	25. <i>Imre Marada, Dr. János Bihari:</i> COMPARISON OF THE EQUIPMENTS FOR THE MEASUREMENT OF THE RECIRCULATION TORQUE IN THE CASE OF SMALL PLASTIC GEARS	106
11. <i>Tatiane Domokos, Dr. Szabolcs Szávai, Dr. Attila Baksa:</i> MODELLING OF TENSILE TEST FOR SIMPLE FLAT SPECIMEN	49	26. <i>Géza Németh:</i> TOWARDS A LOW-NOISE YET EFFICIENT GARDENING	110
12. <i>Sándor Döbrentei, Dr. Károly Váradi:</i> ANALYTICAL VALIDATION OF MOVING HEAT SOURCE DEFINED IN FINITE ELEMENT ENVIRONMENT	53	27. <i>Sándor Fenyvesi, Prof. Dr. Ferenc Orbán:</i> MECHANICAL ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES	114
13. <i>Dr. Csaba Dömötör:</i> EXPERIENCE OF COMPONENT RECONSTRUCTION SOLUTIONS WITH 3D PRINTING	57	28. <i>Dr. Ferenc János Szabó:</i> GRAPHO-ANALYTIC OPTIMIZATION OF PARALLEL KEY SPLINED SHAFT	118
14. <i>Zsuzsa Drágár, Dr. László Kamondi:</i> DETERMINING THE AXIAL SIZE OF THE CONTACT ZONE IN THE MESHING OF CYLINDRICAL EXTERNAL HELICAL GEARS	61	29. <i>Dr. Sándor Szirbik, Dr. Zoltán Virág:</i> VIBRATION ANALYSIS OF A BRIDGE FRAME SUBJECTED TO LOADS USING FINITE ELEMENT ANALYSIS	122
15. <i>Prof. Dr. István Ecsedi, Dr. Attila Baksa, Habbachi Marwen:</i> BENDING OF CURVED BEAM WITH RECTANGULAR CROSS SECTION MADE OF DOUBLE MODULUS FUNCTIONALLY GRADIENT MATERIAL	65	30. <i>Ferenc Borbás:</i> SUSTAINABLE PRODUCT AND SERVICE DEVELOPMENT FOR SOLAR PANEL COVERINGS	126

GÉP

INFORMATIVE JOURNAL

for Technics, Enterprises, Investments, Sales, Research-Development, Market of the Scientific Society of Mechanical Engineering

Dr. Döbröczöni Ádám
President of Editorial Board

Vesza József
General Editor

Dr. Jármái Károly
Dr. Péter József
Dr. Szabó Szilárd
Deputy

Dr. Barkóczi István
Bányai Zoltán
Dr. Beke János
Dr. Bukoveczky György
Dr. Czitán Gábor
Dr. Danyi József
Dr. Gáti József
Dr. Horváth Sándor
Dr. Illés Béla
Dr. Kalmár Ferenc
Dr. Orbán Ferenc
Dr. Pálincás István
Dr. Patkó Gyula
Dr. Péter László
Dr. Penninger Antal
Dr. Szabó István
Dr. Szántó Jenő
Dr. Szűcs Edit
Dr. Tímár Imre
Dr. Tóth László

DEAR READER,

This journal, which you hold in your hands, summarises the material of the development and research works presented in the professional lectures of the XXXIX Seminar of Machine Designers and Product Developers. The authors submitted 29 presentations for the conference held on November 16-17, 2023. Most of the presentations and some other publications, a total of 30 articles, are published here in printed form. We would like to thank the authors and reviewers for their work.

Allow me, Dear Reader, to briefly introduce the history of the National Seminar of Machine Designers and Product Developers. At the national secretary meeting of the Scientific Association for Mechanical Engineering in town Téglás in August 1972, took part 234 delegates from 110 companies and institutions, mostly senior specialists in construction activities, dealt with industrial construction work and its organization. The meeting dealing with construction and design process was initiated by prof. Dr. Zénó Terplán, prof. Dr. József Magyar and Dr. Rezső Száday chief designer, at that time.

The first meeting was held on 22-24 August, 1973 with the participation of the staff of the Department of Machine Elements of the University of Miskolc. The meeting was opened by Professor Dr. Jenő Varga, chief designer of the GANZ Company, emphasizing that there was no such event in Hungary before. After the 1975 event, the Conference of Leading Designers was transformed into the National Seminar of Machine Designers in 1977.

The new research and development projects presented at this year's conference, that the world is constantly changing. Today's priority topics include developments centered around the extraction, storage and use of energy, or research into the manufacturing possibilities of 3D printed finished products. In parallel, the continuous development of traditional technologies supporting new directions is also taking place.

The organizers of the seminar understood that the engineers at the beginning of their career and BSc, MSc and PhD students are also happy to attend regular professional gatherings and would be happy to publish their research and development works. The articles are published in printed form on journal GÉP and on the gepujzag.hu website, in our case with the support of the Scientific Association for Mechanical Engineering and Gazdász Ltd. Thanks for that.

*Dr. Csaba Dömötör
Secretary of the Seminar*

Managing Editor: Vesza József. Editor's address: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.
Phone: +36-30/9-450-270 • 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://eshop.posta.hu/storefront/>), 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

The published articles have been reviewed. • The publication is supported by the National Cultural Fund of Hungary

- Környezetvédelmi terméki nyilatkozat (EPD) szerinti termék tervezés
- A felhasználók ESG fenntarthatóság fejlesztési lehetőségeinek javításával

napenergetikai portfólió

Lakossági, kkv szegmens

Közterületi, ipari és mezőgazdasági lefedési szegmens

