

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA



2018/4.

nka
Nemzeti Kulturális Alap

104 oldal
LXIX. évfolyam

GÉPTERVEZŐK ÉS TERMÉKFEJLESZTŐK XXXIV. SZEMINÁRIUMA

MISKOLC, 2018. november 8–9.

TISZTELT GÉPTERVEZŐ ÉS TERMÉKFEJLESZTŐ KOLLÉGA!

Örömmel tudatjuk, hogy a szerzők 58 előadással jelentkeztek a Géptervezők és Termékfejlesztők 2018. november 8–9-én a MTA Miskolci Területi Bizottságának épületében (Miskolc, Erzsébet tér) megrendezésre kerülő szemináriumára. Az előadások egy része nyomtatott formában a GÉP folyóirat soron következő számában is megjelenik. Köszönjük a szerzők és a lektorok munkáját.

A szeminárium szervezői november 8-án 9 órától és 9-én 8.30 órától várják a résztvevőket. Az előadók előadásait sötétíthető teremben tartják és számítógépes projektor áll rendelkezésükre.

A részvételi díjról és a publikálás költségéről szóló számlákat a Gépipari Tudományos Egyesült elküldte. Tisztelettel kérünk mindenkit, hogy az átutalásáról legyenek szívesek intézkedni és azt leellenőrizni.

Tudjuk, hogy az előadók és a társszerzők elfoglaltak, ennek ellenére kérjük, hogy jelenlétükkel tiszteljék meg a plenáris ülést és a szekciók előadóit.

Levelünkhöz mellékeljük a Szeminárium programját, ami egyben meghívóként is szolgál. Az esetleges észrevételeket e-mail címünkön köszönettel fogadjuk.

Miskolc-Egyetemváros, 2018. október 19.

A szeminárium szervezői nevében szeretettel várja

Dr. Péter József
c. egyetemi tanár, a Szeminárium titkára

Géptervezők és Termékfejlesztők XXXIV. Szeminárium
Gépipari Tudományos Egyesület
Borsod-Abaúj-Zemplén megyei Géptervező Szakosztálya

MTA Miskolci Területi Bizottsága

Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

MTA Miskolci Területi Bizottságának Székháza
Miskolc, Erzsébet tér 3.

2018. november 8 (csütörtök) - 9 (péntek)

Címünk: Géptervezők és Termékfejlesztők
XXXIV. Szeminárium
Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet
H-3515 Miskolc-Egyetemváros
Telefon/Fax: (0036)-46-327-643
E-mail: machpj@uni-miskolc.hu

Géptervezők és Termékfejlesztők XXXIV. Szeminárium
Miskolc, 2018. november 8-9.

I. EMELET, NAGYTEREM

2018. NOVEMBER 8. (CSÜTÖRTÖK), DÉLELŐTT 10.00-TÓL

Elnök: Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella az MTA doktora, intézetvezető egyetemi tanár

10.00-10.05 Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella az MTA doktora, intézetvezető egyetemi tanár, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet: Megnyitó

10.05-10.20 Dr. Kátai László egyetemi docens, dékán, Dr. Szabó István egyetemi tanár, Lágymányosi Attila adjunktus, Lágymányosi Péter tanszéki munkatárs, Szent István Egyetem Mechanikai és Géptani Intézet, Dr. Szakál Zoltán egyetemi docens, Szent István Egyetem Gépipari Technológiai Intézet: Additív gyártástechnológiában alkalmazott anyag szilárdsági jellemzőinek vizsgálata a 3D nyomtatás paramétereinek függvényében

10.20-10.35 Kerényi György egyetemi docens, tanszékvezető helyettes, BME Gép- és Terméktervezés Tanszék: Diszkrét elemes módszer alkalmazása a Gép- és Terméktervezés Tanszék kutatásaiban

10.35-10.50 Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella az MTA doktora, intézetvezető egyetemi tanár, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet: Alumínium nanokompozitok paraméteres optimalizálása

10.50-11.05 Dr. Czifra Árpád intézetigazgató egyetemi docens, Dr. habil. Horváth Sándor c. egyetemi tanár, Óbudai Egyetem: Különböző megmunkálási felületek topológiai térképei

11.05-11.20 Nagy- Abonyi Tamás, Termékfejlesztési-iroda vezető, ELEKTROLUX: Feltaláltuk a padlóápolást – újból!

11.20-11.35 Dr. Kakuk József Fejlesztési Mérnökség vezető, Robert Bosch Power Tool Kft.: A kéziszerszámgép fejlesztés új folyamatai

11.35-11.50 Dr. Lovas László tanszékvezető egyetemi docens, BME Járműelemek és Jármű-szerkezetanalízis Tanszék: Csavarkötés modellezésének kérdései

11.50 Dr. Péter József c. egyetemi tanár, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet: A szemináriummal kapcsolatos tudnivalók összefoglalása.

I. SEKCIÓ, I. EMELET, NAGYTEREM
2018. NOVEMBER 8. (CSÜTÖRTÖK), 14.00-TÓL

Szekcióvezető: Dr. Döbröczöni Ádám Professor Emeritus, Miskolci Egyetem **Dr. habil. Horváth Sándor**, c. egyetemi tanár, Óbudai Egyetem, **Dr. Bercsey Tibor** egyetemi tanár, BME Gép- és Terméktervezés Tanszék

14.00-14.15 Dr. Döbröczöni Ádám Professor Emeritus, Miskolci Egyetem: Társasfotók és évek az NME Gépelemek Tanszékének életében

14.15-14.30 Dr. habil. Horváth Sándor c. egyetemi tanár, Dr. Czifra Árpád, egyetemi docens, Óbudai Egyetem: Akit Pattantyús-Ábrahám Géza a legnagyobb magyar mérnöknek nevezett

14.30-14.45 Dr. Hegedűs József a műszaki tudomány kandidátusa, címzetes egyetemi tanár: Amit az értékelésről mindenkinek tudnia kell

14.45-15.00 Dr. habil. Dr.-Ing. hc. Bercsey Tibor egyetemi tanár, BME Gép- és Terméktervezés Tanszék: A gép- és terméktervezés folyamat és objektum modelljei

15.00-15.15 Dr. habil. Szunyogh Gábor ny. főiskolai tanár, Dr. Gáti József c. egyetemi docens, Dr. habil. Horváth Sándor c. egyetemi tanár, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar: A Jendrassik-féle Dieselmotorok különleges műszaki megoldásai (120 éve született Jendrassik György)

15.15-15.30 Gulácsi Lajos tüzoltó és tűzbiztonság-technikai mérnök, igazságügyi tűzvédelmi szakértő: A magyar tüzoltó története képekben és eseményekben

15.30-15.45 Dr. Darabos Anita DLA adjunktus, BME Gép- és Terméktervezés Tanszék: A természeti analógiák megfigyelése és azok felhasználása a terméktervezésben

15.45-16.00 Dr. Darabos Anita DLA adjunktus, Szalai Judit tanszéki mérnök, BME, Gép- és Terméktervezés Tanszék: Az emberi transzformálódás a formatervezés és technológiai változások tükrében

16.00-16.15 Dr. Kiss Gábor egyetemi docens, Berecz Csilla Éva, Tóth László Óbudai Egyetem: Az autonóm járművekben rejlő lehetőségek és veszélyek

16.15-16.30 Dr. Ficzer Péter egyetemi adjunktus, BME Járműelemek és Jármű-szerkezetanalízis Tanszék: Az ipar 4.0 és az egyedi orvosi implantátumok kapcsolata

16.30-16.45 Németh Géza egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet: Forgató csavarrugó modellezése és igénybevételei

16.45-17.00 Bogyai Péter demonstrátor, Dr. Ficzer Péter egyetemi adjunktus, Dr. Horváth Eszter egyetemi adjunktus, Dr. Lovas László egyetemi docens, BME Járműelemek és Jármű-szerkezetanalízis Tanszék: Csontokról készített CT felvételektől a CAD geometriáig

17.15-17.15 Kardos Szilárd, tanszéki mérnök, BME Gép- és Terméktervezés Tanszék, Dr. Krísch Róbert, ügyvezető K.K.K. 99 Kft.: Sikkerekes hullámhajtómű fejlesztése a K.K.K. 99 Kft.-nél.

II. SEKCIÓ, I. EMELET, DEÁK TEREM
2018. NOVEMBER 8. (CSÜTÖRTÖK) 14.00-TÓL

Szekcióvezető: Dr. Czifra Árpád egyetemi docens, Óbudai Egyetem, **Gépészeti és Biztonságtudományi Intézet**, **Dr. Bihari János** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

14.00-14.15 Dr. Ecsedi István Professor Emeritus, Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet, Dr. Baksa Attila, egyetemi docens, PhD, Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet: Inhomogén, anizotrop ellipszis keresztmetszetű rudak Saint-Venant csavarása

14.15-14.30 Dr. Orbán Ferenc Professzor Emeritus, Pécsi Tudományegyetem, Gépészmérnöki Tanszék. Síklálú tartályok gazdaságos méretezése

14.30-14.45 Dr. Hriczó Krisztián egyetemi adjunktus, ME Matematikai Intézet, Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella az MTA doktora, intézetvezető egyetemi tanár: A mágneses tér hatása viszkózus ferrofluid áramlásban

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

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

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczöni Ádám

elnök

Vesza József

főszerkesztő

Dr. Jármay Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

főszerkesztő-helyettesek

Dr. Barkóczi István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bercsey Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Kármán Antal

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. Timár Imre

Dr. Tóth László

Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

Dr. Zobory István

TISZTELT OLVASÓ!

A Géptervezők és Termékfejlesztők XXXIV. Szemináriumának szervezését a megszokott időben elkezdtük, a résztvevők számításba vehető körét leveleinkkel megkerestük, a jelentkezés határidejét kicsit módosítva a barátságos invitálást megismételtük, nem eredménytelenül. A Géptervezők és Termékfejlesztők XXXIV. Szemináriumára 58 előadással jelentkeztek, és 30 szakkikk érkezett; a terjedelmet tekintve annyi, mint az előző évben. A szakkikkek a Gép folyóirat két lapszámában jelennek meg.

Az előadók, a szerzők és a társszerzők nevét vizsgálva a változás karakteres. Kitűnő, jól ismert szerzők hiányoznak, új és biztató nevek jelentek meg. Sok a fiatal előadó, a 30 szakkikk szerzője, társszerzője doktorandusz vagy egyetemi hallgató. A jelenség nem egyedi, a világ más részén, és más tudományterületen is hasonló a változás, hogy a háború után született népes korosztály mellett vagy helyett lényegesen fiatalabb hölgyek és urak jelennek meg. Szívesen nézem a NASA űrkutatással foglalkozó oldalait, a tervezők és fejlesztők között sok a fiatal hölgy, akik a férfiakétól eltérő látásmódjukkal eredeti megoldásokat szülnek, – talán nem bántó a megfogalmazás.

A változás az előadások és a szakkikkek témájában is érzékelhető. Az előadók horizontja, az elérhető ismeretek és megoldható feladatok köre a korábbinál szélesebb, az előadásokban a matematika, a mechanika, az anyag-tudomány, a gyártástudomány, a géptervezés, a tervezésemélet eredményei mellett az informatika, az ergonómia, a biológia, az orvostudományok, a pszichológia, az ipari formatervezés, és a természeti analógiák kutatásának eredményei is megjelentek. Örömmel írom, hogy ebben az évben van technikatörténettel foglalkozó előadás és szakkikk is, historia est magistra vitae.

Dr. Péter József

a Szeminárium szervező titkára

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

Telefon/fax: 06-46/379-530, 06-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

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

Telefon: 06-1/202-0656, fax: 06-1/202-0252, e-mail: a.gaby@gteportal.eu, internet: www.gte.mtesz.hu

A GÉP folyóirat internetcíme: <http://www.gepujsag.hu>

Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Igaz Jenő ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Telefon: 06-46/379-530 • e-mail: gazdasz@chello.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 06-1-767-8262 számon, levélben a MP Zrt. 1900 Budapest címen. Külföldre és külföldön előfizethető a Magyar Posta Zrt.-nél: www.posta.hu WEBSHOP-ban (<https://eshop.posta.hu/storefront/>), 1900 Budapest, 06-1-767-8262, hirlapelofizetes@posta.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. Dr. Czifra Árpád, Dr. Horváth Sándor: 5 KÜLÖNBÖZŐ MEGMUNKÁLÁSÚ FELÜLETEK TOPOLOGIAI TÉRKÉPEI	11. Kis Katalin, Dr. Ficzer Péter, Dr. Kovács Norbert Krisztián, Dr. Szabó Gábor: 49 ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁVAL ELŐÁLLÍTHATÓ RUGALMAS MŰANYAGOK VIZSGÁLATA
2. Debreczeni Dániel, Dr. Kamondi László: 9 EVOLVENS, KÜLSŐ FOGAZATÚ, HENGERES FOGASKERÉKPÁROK KAPCSOLÓDÁSI MEREVSÉGÉNEK ÉS DEFORMÁCIÓJÁNAK MEGHATÁROZÁSA	12. Kocsis B., Kóti D, Kovács G.: 54 KORSZERŰ AMORF ÜVEGFÉM SZALAGOK VÁGÁS TECHNOLÓGIÁJÁNAK VIZSGÁLATA KLASSZIKUS METALLOGRÁFIAI- ÉS EGYEDI MÁGNESES MÉRÉSEK SEGÍTSÉGÉVEL.
3. Dr. Dömötör Csaba: 13 IPARI TERMÉK- ÉS FORMATERVEZŐ MÉRNÖK HALLGATÓK KIÁLLÍTÁSÁNAK SZERVEZÉSI TAPASZTALATAI	13. Dr. Lovas László: 59 CSAVARKÖTÉS MODELLEZÉSÉNEK KÉRDÉSEI
4. Dr. Ficzer Péter: 17 AZ IPAR 4.0 ÉS AZ EGYEDI ORVOSI IMPLANTÁTUMOK KAPCSOLATA	14. Lukács Judit, Melegh Gábor: 63 VÁLASZFELÜLETEK MÓDSZERÉNEK ALKALMAZÁSA GÉPJÁRMŰVEK AKUSZTIKAI VIZSGÁLATÁBAN
5. Bogya Péter, Dr. Ficzer Péter, Dr. Horváth Eszter, Dr. Lovas László: 21 CSONTOKRÓL KÉSZÍTETT CT FELVÉTELEKTŐL A CAD GEOMETRIÁIG	15. Németh Géza: 69 FORGATÓ CSAVARRUGÓ MODELLEZÉSE ÉS IGÉNYBEVÉTELEI
6. Horváth Richárd, Stadler Róbert Gábor: 25 ÜVEGSZÁLLAL ERŐSÍTETT POLIMER (GFRP) MARÁSI VIZSGÁLATA	16. Németh Géza: 73 KENT ACÉL FELÜLETPÁROK SÚRLÓDÁSÁNAK VIZSGÁLATA
7. Hriczó Krisztián: 31 A MÁGNESES TÉR HATÁSA VISZKÓZUS FERROFLUID ÁRAMLÁSÁSBAN	17. Suriné Lengyel Veronika: 77 TPM VS. IPAR 4.0 – ANOMÁLIA VAGY LEHETŐSÉG?
8. Kacsvinszki-Szabó Vera, Telekes Gábor: 35 NAGY TERHELÉSŰ ÉS FESZTÁVOLSÁGÚ AGRÁRIPARI KOMPLEXUMOK CÖLÖPALAPOZÁS TERVEZÉSÉHEZ HASZNÁLT MÓDSZEREK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	18. Dr. Szabó Ferenc János: 82 OPTIMUMKERESŐ ALGORITMUSOK ITERÁCIÓTÖRTÉNETÉNEK VIZSGÁLATA
9. Kardos Szilárd, Dr. Krisch Róbert: 41 SÍKKERÉKES HULLÁMHAJTÓMŰ FEJLESZTÉSE A K.K.K. 99 KFT-NÉL	19. Máté Tamás, Dr. Zwierczyk Péter: 86 A HŐTÁGULÁS OKOZTA REPEDÉS VIZSGÁLATA VÉGESELEMES MÓDSZERREL
10. Dr. Kátai László, Dr. Szabó István, Lágymányosi Attila, Lágymányosi Péter, Dr. Szakál Zoltán: 45 ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁBAN ALKALMAZOTT ANYAG SZILÁRDSÁGI JELLEMZŐINEK VIZSGÁLATA A 3D NYOMTATÁS PARAMÉTEREINEK FÜGGVÉNYÉBEN	20. Tóth Dániel, Dr. Takács György, Dr. Szilágyi Attila: 90 CSAPÁGYHIBÁK FELTÁRÁSA IDŐTARTOMÁNYBELI MÓDSZEREKKEL
	21. Tóth Sándor Gergő, Dr. Takács György, Dr. Szilágyi Attila: 94 A HIDROSZTATIKUS CSAPÁGYTERVEZÉS ÉS OPTIMALIZÁLÁS JELENLEGI FEJLEMÉNYEI

KÜLÖNBÖZŐ MEGMUNKÁLÁSÚ FELÜLETEK TOPOLÓGIAI TÉRKÉPEI

TOPOLOGICAL MAPS OF DIFFERENTLY MACHINED SURFACES

Dr. Czifra Árpád PhD, egyetemi docens, Óbudai Egyetem, Gépészeti és Biztonságtudományi Intézet
czifra.arpad@bgk.uni-obuda.hu

Dr. habil. Horváth Sándor, c. egyetemi tanár, Óbudai Egyetem
horvath.sandor@bgk.uni-obuda.hu

ABSTRACT

Nowadays tribological behaviour of engineering surfaces is in focus of machine design. Topological map – based on RSk and Rku parameters – is commonly used to characterise the load carrying properties of microgeometries and microtopographies. Present work deals with other roughness parameter pairs to prepare new type of topological maps.

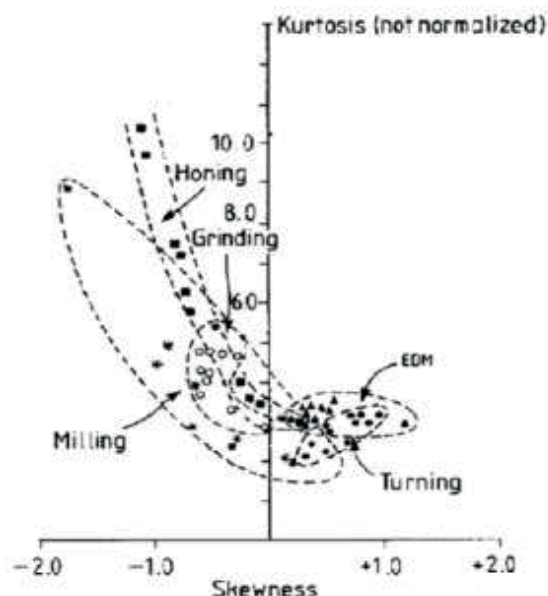
1. BEVEZETÉS

Műszaki felületek mikrogeometriájának, mikrotopográfiájának vizsgálatában a legelterjedtebb mód az érdességi (hullámossági vagy szűretlen) paraméterek használata. Bármilyen kiértékelési technikáról legyen is szó, akár a legismertebb M-rendszerről, vagy a francia autóipar által kedvelt motif módszerről, esetleg a VDI (német mérnök szövetsége) által kiadott domináns hullámhosszról, minden szabvány és ajánlás mérőszámokat, paramétereket használ.

A felület összetettsége és a mikrogeometriák, mikrotopográfiák változatossága miatt napjainkra már közel száz szabványos mérőszám létezik a felületek jellemzésére. Mára már nyilvánvalóvá vált, hogy egyetlen paraméter használatával nem lehet pontosan leírni a felület jellegét, ezért egyre több műszaki dokumentáción tűnik fel egyszerre több érdességi mérőszám.

Régóta ismert az a tény is, hogy egyes mérőszám kombinációk hatékonyan képesek jellemezni a felületet, míg más kombinációk kevésbé hatékonyak. A legismertebb az átlagos érdesség (Ra) és érdesség magasság (Rz) kapcsolatára vonatkozó összefüggés. A két paraméter aránya Rz/Ra utal a megmunkálás jellegére. Például köszörült felületnél ez az arány 5,8-9,5 közötti értéket mutat, míg esztergálásnál 3,4-7,5 közötti értékek mérhetők függően a megmunkálási folyamat jellemzőitől [1].

A paraméterkombinációk megadhatók ún. topológiai térkép formájában, mely a jellemezésre használt két paraméter függvényében ábrázolja az egyes felületeket. A legismertebb topológiai térképet Whitehousnál [2] találjuk, mely az RSk (skewness - ferdeségi mérőszám) és Rku (kurtosis - lapultsági mérőszám) koordináta rendszerében helyezi el az egyes megmunkálásokat (ld. 1. ábra). A két amplitúdó (csak magasságkoordinátáktól függő) paraméter egymástól matematikailag független, de a gyakorlatban közel parabolikus jellegű kapcsolatot mutat (ld. 1. ábra).



1. ábra. RSk - Rku topológiai térkép [2]

Későbbi kutatások rámutattak arra, hogy nem pusztán a megmunkálás típusa, hanem sokkal inkább a megmunkálási folyamat paraméterei alapján lehet elhelyezni az egyes felületeket ezen a topológiai térképen. Horváth és társai [3] a forgácsoló szerszám élgeometriájának hatását vizsgálták és döntő tényezőnek találták a topológia térképen való elhelyezkedésben.

Ez a következtetés jól összecseng mindazon kutatók eredményeivel, akik az RSk-RKu topológiai térképet a felület tribológiai jellemzésével és a működési folyamatban betöltött szerepével kapcsolták össze. [4] és [5] munkájukban az RSk és RKu paraméterek érintkezési, súrlódási és felületi rétegképzésben betöltött szerepét vizsgálták.

Kevésbé ismert, de hasonló funkciót betöltő topológiai térképpel találkozunk Petropoulos és társainál [6], akik a saját maguk által megalkotott paramétereken nyugvó ún. „Beta function chart” használatával jellemezték a forgácsolási folyamatot.

Jelen munkánkban, korábbi mikrotopográfiai mérésekből felállított adatbázist használva, kerestünk olyan paraméterkombinációkat, melyek hasonló módon topológiai térképet alkotva jellemezhetik a felületet. A vizsgálatok 3D-s méréseken alapultak és kiterjedtek az amplitúdó paramétereken túl a térközi, hibrid és működési paraméterek körére, valamint kiterjedtek a megalkotott topológia térkép értelmezésére és felhasználására is.

2. HIBRID PARAMÉTEREK TOPOLOGIAI TÉRKÉPE

Munkánk során három megmunkálási eljárást, esztergálást, marást és köszörülést vizsgáltunk. A mért felületek az Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karán az elmúlt 20 évben elvégzett mérésekből készített adatbázisból kerültek ki. Több mint 100 mikrotopográfia került kiértékelésre. Ezek vegyes forgácsolási paraméterekkel, különböző anyagokból kimunkált felületek voltak.

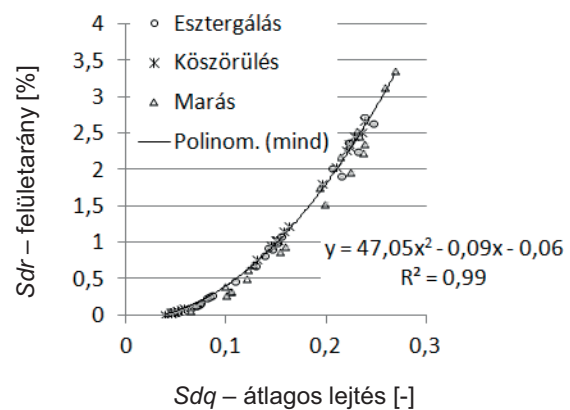
Mérési jellemzőiket tekintve viszont minden esetben 1x1 mm²-es felületrészről 2x2 µm-es lépésközzel készült mikrotopográfia került elemzésre, annak érdekében, hogy a mérési beállítások eltérése ne torzítsa az egyes paramétereket.

Különböző paraméter kombinációkat vizsgáltunk: Sq-Sz; Sal-Sq; Sal-Str; Sdq-Sq; Sdq-Spk; Sdr-Sq; Sdq-Sdr; Spk-Sq; Sk-Sq. A felsorolt topográfiai paraméterek értelmezése a [7] szabványban megtalálható.

Az Sdq-Sdr paraméterpár esetén érdekes összefüggés mutatkozott. Mindkét paraméter a hibrid paraméterek csoportjába tartozik. Ezek a paraméterek magasságirányú és térközi jellemzőket egyaránt magukba foglalnak. Eltérő módon, de mindkét paraméter a felület tagoltságát jellemzi. Az Sdq vagy Sdq paraméter, a felületi mikrojeometria hajlásának négyzetes középértéke. Jelentéstartalmát tekintve a mérési pontok közötti gradiens négyzetes átlagát

mutatja, azaz minél tagoltabb a felület, annál nagyobb értékű, de értéke függ az irányultságtól és kapcsolódik az érdesség amplitúdó paramétereihez. Az Sdr paraméter a felületarány nevet viseli. Ez a paraméter megmutatja a mért mikrotopográfiát burkoló felület nagyságának arányát a mintavételi területhez képest. Itt is igaz, hogy minél tagoltabb a felület, annál nagyobb a paraméter értéke. A két paraméter matematikai definícióját és szoftveres implementációját diszkrét mintavételi esetre a [8] szakirodalom tartalmazza.

A két paraméter által alkotott topológiai térképet mutatja a 2. ábra.



2. ábra. Sdr-Sdq (hibrid) topológiai térkép

Két jellegzetességet fedezhetünk fel a térképen. Az egyik a két paraméter rendkívül erős korrelációja. Matematikai szinten semmiféle kapcsolat nincs a két paraméter között, hiszen az Sdq esetén az x és y irányú gradiensek négyzetes átlagából számítja a paramétert, míg az Sdr esetén háromszöglapokkal borítja a digitalizált felszínt és ezek összterülete a kiinduló alap a paraméter meghatározásához. További kutatási feladat, hogy irányultsággal nem rendelkező, más jellegű felületek esetén is megmarad-e ez a függvénykapcsolat, vagy megváltozik.

A másik érdekesség, hogy bár három eltérő jellegű megmunkálásról van szó, az egyes mérésekhez tartozó pontok vegyesen jelennek meg a térképen; a három megmunkálás nem különül el. Ezzel együtt széles tartományt fednek le, mely nyilvánvalóan a felületek eltérő sajátosságára utal.

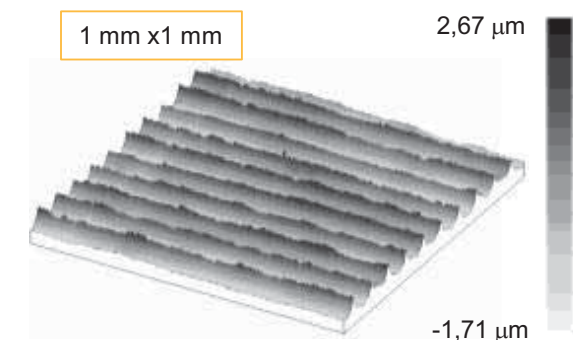
3. HIBRID TOPOLOGIAI TÉRKÉP HASZNÁLATA

Az erős korreláció önmagában nem fejez ki semmiféle tribológiai jellegzetességet, de a paraméterek rendezettsége és a széles tartomány, melyet felölelnek, felveti a kérdést, hogy vajon milyen tribológiai tulajdonság rendelhető a térkép egyes régióihoz. Felfedezhető-e olyan

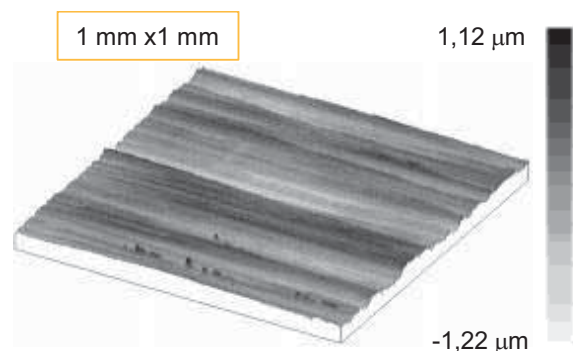
sajátosság a felületeken, melynek leírása hasznos lehet a működésben betöltött szerep szempontjából? Tulajdonképpen arra kerestük a választ, hogy használható-e a térkép valamire?

Ennek a kérdésnek a megválaszolásához mindhárom megmunkálás esetén megnéztük az egyes régiókhoz tartozó topográfiai képeket. A vizsgálatokhoz azok közül a topográfiaiak közül válogattunk, melyeknél az Sdr értéke 0,1 alatti ($<5,7^\circ$), illetve 0,2 fölötti ($>11,3^\circ$).

A 3. és 4. ábra rendre egy esztergált és egy köszörült felületet mutat, melyeket a hibrid topológiai térkép (ld. 2. ábra) bal alsó sarkában található pontok jellemeznek.



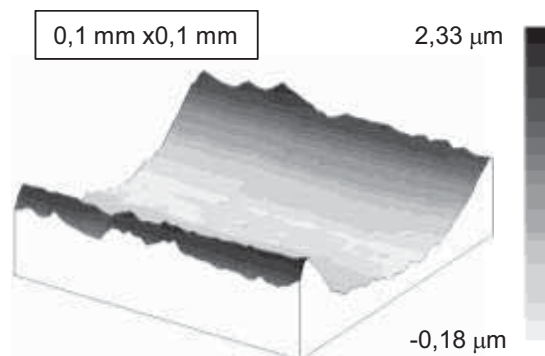
3. ábra. Esztergált felület topográfiája; $1 \times 1 \text{ mm}^2$ felület; $2 \times 2 \text{ μm}$ mintavétel ($Sdq=0,08$; $Sdr=0,25\%$)



4. ábra. Köszörült felület topográfiája; $1 \times 1 \text{ mm}^2$ felület; $2 \times 2 \text{ μm}$ mintavétel ($Sdq=0,05$; $Sdr=0,06\%$)

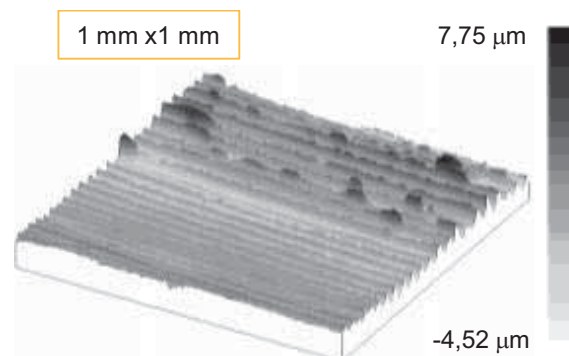
Mindkét topográfia egyenletes, szép megmunkálást mutat. A megmunkálási nyomok rendezettek, nem látszanak megmunkálási hibák, komolyabb felületi sérülések. A hibrid paraméterek nem elsősorban a domináns topográfiai elemeket (pl. megmunkálási nyomok) jellemzik, hanem a felület apró részleteit pontosan ugyanolyan, vagy még nagyobb súllyal foglalják magukba. Az alacsony Sdq és Sdr érték kevésbé tagolt, lokális kiemelkedésektől mentes felületre utal. Ez azt is jelenti, hogy nem csak a megmunkálási nyomok egyenletesek, hanem a megmunkálási nyomok részletei, azaz egy-egy nyomon belül is sima, felszakadásoktól,

tagoltságoktól mentes felületet tapasztalunk. A 3. ábrán látható felületről egy esztergálási nyomába pillant be az 5. ábra. A megmunkálási nyom „gerinceit” leszámítva rendkívül szép, egyenletes, sima felszín tapasztalunk, mely indokolja a hibrid paraméterek alacsony értékét. További hasonló Sdq és Sdr értékekkel rendelkező felületek esetén is hasonló felületet tapasztalunk.



5. ábra. Esztergált felület megmunkálási nyoma; $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$ felület; $2 \times 2 \text{ μm}$ mintavétel

A 6. és 7. ábra olyan topográfiai képeket mutat, melyek a hibrid topológiai térkép jobb felső sarkához tartoznak. A 6. ábrán esztergálást, míg a 7. ábrán mart felületet látunk.

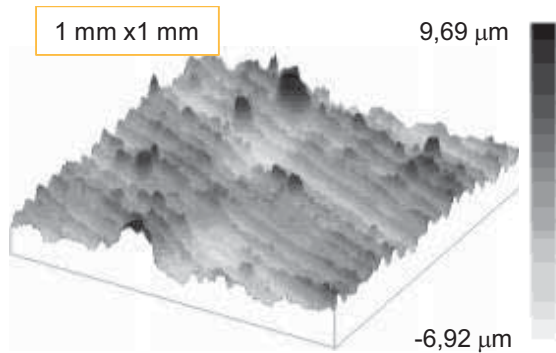


6. ábra. Esztergált felület topográfiája; $1 \times 1 \text{ mm}^2$ felület; $2 \times 2 \text{ μm}$ mintavétel ($Sdq=0,24$; $Sdr=2,65\%$)

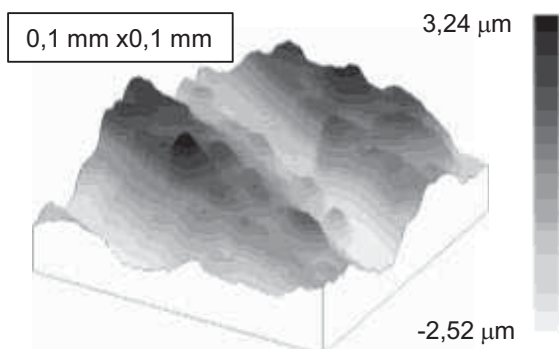
A két bemutatott topográfia esetén a felület durva megmunkálási sérüléseket tartalmaz. Felszakadások, elkenődések, kiugró csúcsok, helyenként mélyebb völgyek taglalják a felületet. Ez az erős tagoltság a hibrid paraméterek emelkedésében jelentkezik. A felület megmunkálási nyomainak „mélyén” rejlő geometriai eltéréseket tárja fel a 8. ábra. Világosan látszanak a megmunkálási nyomok csúcsain jelentkező éles kiugrások, kiszakadások, de ezek mellett a völgyek is tagoltak, itt is találunk lokális kiemelkedéseket.

Hasonlóan magas hibrid paraméter értékekkel rendelkező felületek vizsgálata során nem minden esetben volt megfigyelhető hasonló

jelenség. Az okok feltárása további részletes vizsgálatot igényel.

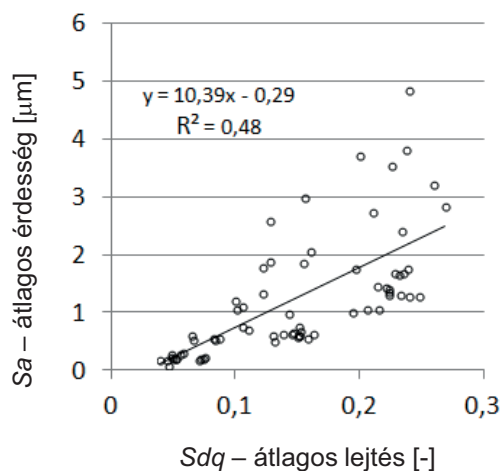


7. ábra. Mart felület topográfiája; 1x1 mm² felület; 2x2 μm mintavétel ($Sdq=0,23$; $Sdr=2,56\%$)



8. ábra. Mart felület topográfiája; 0,1x0,1 mm² felület; 2x2 μm mintavétel

A felületek értékelése során felmerült a kérdés, hogy vajon ezen hibrid paraméterek értéke mennyiben függ a felület érdességének nagyságától. A 9. ábra az Sdq paraméter függvényében mutatja az átlagos érdességet (Sa) a vizsgált adatbázison értelmezve. A két paraméter nem független egymástól, de közöttük szoros kapcsolat nem mutatható ki.



9. ábra. Sdq - Sa paraméterek kapcsolata

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Vizsgálataink eredményeiként az alábbi következtetésekre jutottunk:

- Műszaki felületek jellemzésére a szabványban definiált érdességi paraméterek kombinált alkalmazása hatékonynak bizonyult.
- A Sdq - Sdr hibrid paraméterek alkalmazása topológiai térképként fontos jellemzője a felületnek, alkalmazásával értékes információkhoz juthatunk.
- A Sdq és Sdr paraméterek emelkedése a vizsgált forgácsolt felületeknél a megmunkálás esetleges hibáira hívja fel a figyelmet.

5. IRODALOM

- [1] Palásti K B, Sipos S., Czifra Á.: $Rz = 4 \cdot Ra$ és egyéb érdességi értelmezések a forgácsolt felületek értékelésében, *GYÁRTÓESZKÖZÖK, SZERSZÁMOK, SZERSZÁMGÉPEK* 2012:(1), pp. 20-24. (2012)
- [2] Whitehouse, D.J.: *Handbook of surface metrology*, Inside of Physics Publ., Bristol (1994)
- [3] Horváth Richárd, Czifra Árpád, Drégelyi-Kiss Ágota: Effect of conventional and non-conventional tool geometries to skewness and kurtosis of surface roughness in case of fine turning of aluminium alloys with diamond tools, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 78:(1-4) pp. 297-304. (2015)
- [4] Marko Sedlacek, Bojan Podgornik, Joze Vizintin: Correlation between standard roughness parameters skewness and kurtosis and tribological behaviour of contact surfaces, *Tribology International* 48 (2012) 102–112
- [5] Pradeep L., Menezes, Kishore, Satish V. Kailas: Influence of surface texture and roughness parameters on friction and transfer layer formation during sliding of aluminium pin on steel plate, *Wear* 267 (2009) 1534–1549
- [6] G.P. Petropoulos, C.N. Pandazaras, N.M. Vaxevanidis, A. Antoniadis: Multi-parameter identification and control of turned surface textures, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 29., pp. 118-128 (2006)
- [7] ISO 25178/2-2012: Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters (2012)
- [8] Kovács K., Váradi K, Palásti K. B.: Műszaki felületek mikrotopográfiájának jellemzése, *Gépgyártástechnológia*, Vol. 39, Iss.8. p. 31-38 (1999)

ZAHNFEDERSTEIFIGKEITS- UND VERFORMUNGSBERECHNUNG BEI EVOLVENTISCH-AUSSENVERZAHNTEN, ZYLINDRISCHEN ZAHNRADPAAREN

EVOLVENS, KÜLSŐ FOGAZATÚ, HENGERES FOGASKERÉKPÁROK KAPCSOLÓDÁSI MEREVSÉGÉNEK ÉS DEFORMÁCIÓJÁNAK MEGHATÁROZÁSA

*Debreczeni Dániel MSc, PhD Student, Institut für Maschinen- und
Produktplanung an Universität Miskolc,
Dr. Kamondi László PhD, Institut für Maschinen- und Produktplanung
an Universität Miskolc*

INHALT

In diesem Artikel wird die Möglichkeiten der Zahnfedersteifigkeits- und Verformungsberechnung bei evolventisch-aussenverzahnten, zylindrischen Zahnradpaaren durchgeschaut. Der Artikel bietet einen Einblick in die analytische Methoden und in die problematischen Bereichen erörtert.

Für die weitere Verfeinerung der analytischen Ergebnissen wird die Aufmerksamkeit auf die FE Analysen gemacht. Hier wird ohne Anspruch auf Vollständigkeit auf manche Aspekte zu dieser Untersuchungen hingewiesen.

Das Ziel des Artikels ist die Vorstellung der Komplexität der ausführlichen Definition des Zahnfedersteifigkeits- und Verformungsverlauf. Diese Analysen sind zu der genauen Verzahnungsauslegung unverzichtbar, da die Bestimmung der weiteren Kontakteigenschaften, z.B. der Hertzsche Pressung oder Drehwegfehler, aufgrund dieser Parameter möglich ist.

1. EINFÜHRUNG

Die je genauere Bestimmung der Eingriffseigenschaften und damit je feinere Auslegung der Verzahnungsgeometrie ist eine kontinuierliche Anforderung in der modernen Fahrzeugsindustrie. Hier muss aber beachtet werden, dass die Verzahnungskontakt nur eine Teile des Systems ist, deshalb hängt die zielführende Genauigkeit der Untersuchung der Kontakteigenschaften von der Verfeinerung der späteren Systemanalysen. Eine weitere Aspekte ist die vorhandene Zeit, weil es oft die durchführbare Methoden einschränkt.

Zu der Bestimmung sind sowohl analytischen als auch FE Methoden verfügbar. In den nächsten wird darauf hingewiesen, dass die Anwendung der einzelnen Formeln in welchen Fällen zielführend oder nicht möglich ist.

Die typische Verläufe der Gesamt- und Teilverformungen bei analytischer Kontaktanalyse wird durch die Ergebnisse von Petersen

vorge stellt. Für die Betrachtung der Potentialen der FE Analyse wird die Untersuchungen von Wanderer genutzt. Durch diese Beispiele ist die Wichtigkeit der zielführenden Auswahl der zu den Erwartungen entsprechenden Methode gut sichtbar.

Die nächsten Abschnitte werden einen Einblick in dieser Thematik ermöglichen. Bei der Formulierung der Feststellungen wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben.

2. ANALYTISCHE BERECHNUNG DES EINZELSTEIFIGKEITS UND FEDERSTEIFIGKEITSVERLAUFS

Ein kritischster Aspekt der optimierten Verzahnungsauslegung ist die je genaue Bestimmung der Kontaktsteifigkeiten. Hier kann normalerweise zwei Weg gewählt werden. Das Erste ist die analytische Methoden, das Zweite die FE Analyse. In diesem Kapitel werden ohne Anspruch auf Vollständigkeit die analytische Berechnungsmodellen durchgeschaut.

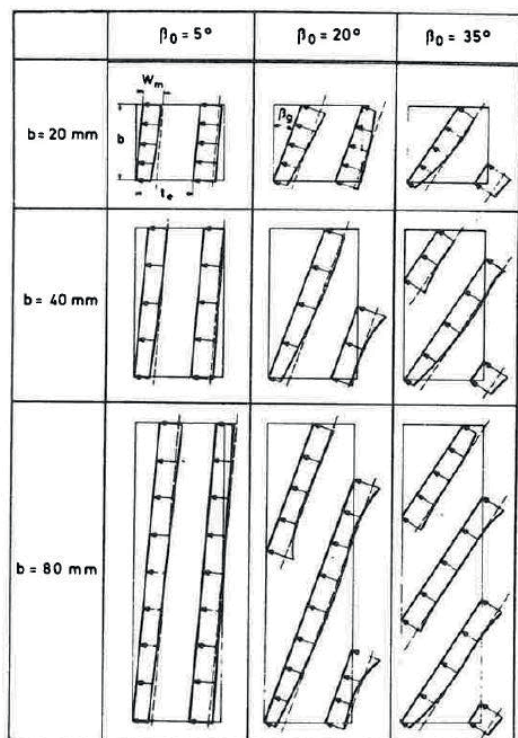
In der Praxis am meisten genutzte Formeln liegen in den ISO 6336 und DIN 3990 Standarten. Diese Gleichungen sind für die Bestimmung der maximalen Steifigkeitswerte anwendbar. Dieses Maximum tritt normalerweise in der Nähe des 'C' Kontaktpunkts auf.

Ziegler [10] hat aus Rechnungen und Messungen solche Näherungsformeln entwickelt, welche für die Bestimmung der minimalen und maximalen Federsteifigkeiten des Kontakts nutzbar sind. Die Formeln nach Ziegler gelten nur für Stahl als Werkstoff und der Wertebereich von mehreren Parameter ist eingeschränkt. Zum Beispiel muss die Porfilverschiebung des Rades kleiner sein als dieser Wert des Ritzels und das Zähnezahlnverhältnis darf nicht kleiner als 1 sein. Ziegler hat den Einzelsteifigkeitsverlauf mit einer Parabel 2. Ordnung dargestellt und durch einfache Addition im Doppelingriffsbereich die Zahnfedersteifigkeit hergestellt. Linke hat später auf die Notwendigkeit der Ergänzung des

Modells mit der Überdeckungsänderung unter Last Aufmerksam gemacht.

Der größte Vorteil der bisherigen Methoden ist die einfache Handhabung der Formeln. Aber für die Bestimmung der Kontaktsteifigkeiten in einem beliebigen Kontaktposition sind anedere, komplexere Methoden auch verfügbar. Diese Berechnungen geben die Basis der analytischen Kontaktanalyse. Die meistens genutzte Methode ist die Berechnungsmodell von Weber und Banaschek [9]. In diesem Fall ist die Verformung des Zahnradpars auf die Verformung der Radkörper mit starren Zähne, die Formänderung der Zähne und die Deformation durch Hertzsche Pressung verteilt. Die Formeln sind in ebener Verzerrungszustand definiert.

Lutz [5] hat mit der Verwendung der Formeln von Weber und Banaschek eine eigene Methode entwickelt, die zu der Verformungsberechnung der asymmetrischen Schneckenradzähne anwendbar ist. Die Formeln nach Lutz sind in ebener Verzerrungszustand definiert. Er hat auch die Berechnungsmodell der Radkörper-verformung so ergänzt, dass die Berücksichtigung beliebiger Querkontraktionszahl schon möglich ist. Lutz hat die Hertzsche-Verformung vernachlässigt.



1. Bild: Zahnkraftverlauf längs Berührlinien [7]
 Verzahnungsdaten: $z_1=z_2=20$, $m_n=5$, $x_1=x_2=0$,
 $\alpha_n=20^\circ$

Kagawa [3] hat die Verformungsberechnung eines eingespannten Plattenträger an einem Ersatzbalken in dem Fall der endlichen Erstreckung beschrieben. In dem Modell von Kagawa ist der Plattenträger längs seiner freien Kante belastet. Er hat durch das Verhältnis der Verformung in einem beliebigen Stelle und der Kraft in einem beliebigen Stelle des Trägers eine Einflußfunktion definiert.

Die Überführung der Einflußfunktion des Plattenträgertheorie in das Modell von Weber und Banaschek ist von Schmidt [7] ausgearbeitet. Die Kombination gibt eine gute Möglichkeit für Berechnung der Lastverteilung längs der Berührlinien und der mittleren Lastaufnahme eines Zahnes in einer beliebigen Eingriffsstellung.

Ein kritischer Punkt der analytischen Methoden ist, dass die genauere Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen in den Kontakt liegenden Zähne nicht möglich ist. Ein gutes Beispiel ist darauf die Steifigkeitsverlauf bei Lastübernahme eines neues Zahnpaares oder die Addition der Einzelsteifigkeitswerte in Doppeleingriffsbereich. Für die tiefere Analyse dieser Effekte geben eine gute Möglichkeit der FE Methoden.

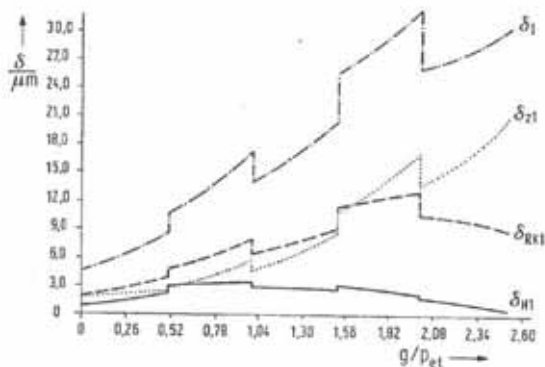
3. ANALYTISCHE VERFORMUNGSBERECHNUNG BEI HOCH ÜBERDECKENDEN STIRNRADPAARUNGEN

Wegen der schnelleren Variationsberechnung sind die analytische Methoden als Grundverfahren zur Verzahnungsauslegung weitgehend genutzt. Die Auswirkung der Lastverteilung auf die Verformung und die Zahnfußträgfähigkeit von hoch Überdeckenden Stirnradpaarungen hat Petersen [6] ausführlich zusammengefasst.

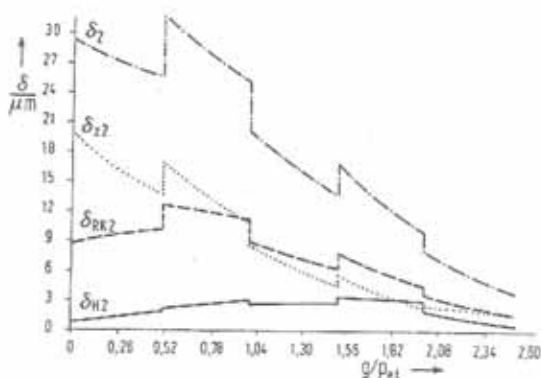
Er hat aufgrund der analytischen Verformungsberechnungen einen Federmodell entwickelt. In diesem Modell kann die Gesamtverformung durch eine lineare Funktion der Zahnnormalkraft nicht berechnet sein, deshalb hat Petersen zur Lösung eine Taylor-Reihen-Entwicklung durchgeführt.

Die Bilde zeigen in dem Modell von Petersen die typische Verläufe der Gesamt- und Teilverformungen in Kontakt bei der hoch überdeckenden Strinradpaarungen. Der Index 1 bezeichnet das Ritzel und der Index 2 bezeichnet das Rad. Das 'sigma-Z' zeigt die Verformung von Zahn, 'sigma-RK' bedeutet die Verformung des Radkörpers und 'sigma-H' markiert die Hertzsche-Abplattung.

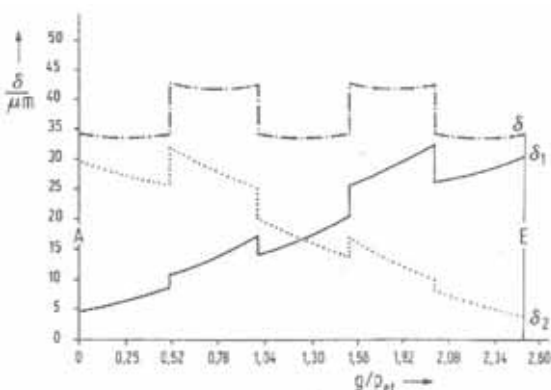
Diese Verläufe kann durch FE-Methoden mit der Berücksichtigung der Wechselwirkung verfeinert werden. Aber diese Optimierungen bedeuten schon deutlich größeren Arbeits- und Zeitaufwand, der in den Praxis oft nicht möglich ist.



2. Bild: Verläufe der Gesamt- und Teilverformungen des Ritzels [6]



3. Bild: Verläufe der Gesamt- und Teilverformungen des Rades [6]



4. Bild: Verläufe der Gesamt- und Teilverformungen des Zahnradpaares [6]

4. FEM BERECHNUNG DES EINZELSTEIFIGKEITS UND FEDERSTEIFIGKEITSVERLAUFS

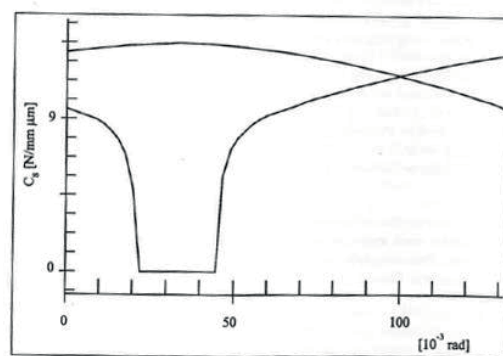
Bei FE Analyse der Verzahnungen ist ein kritischer Punkt die je genauere, und besser

durchsichtbare Modellierung der Zahngeometrie. Für dieses Vorhaben ist die Nutzung solcher Programme sehr wichtig, mit den ist die Geometrie aufgrund der Werkzeuggeometrie und Einstellungen der Fertigungstechnologie generierbar.

Die FE Analyse sind abhängig von der Untersuchungen sowohl durch 2-dimensionale als auch durch 3-dimensionale Modellen ausführbar. Zum Beispiel der Einfluss des Zahnprofils auf die Kontaktsteifigkeiten ist mit den 2-dimensionalen Modellen gut untersuchbar, aber zur Analyse des Drehwegfehlers ist nur die 3-dimensionale Geometrie anwendbar.

Weitere wichtige Punkt ist in der Berechnung berücksichtige Zähnezahl. Ein gutes Beispiel ist die Analyse in den Zahnfuß des Nachbarzahns wirkenden Druckspannung. Als allgemeine Empfehlung ist nutzbar, dass die berücksichtigte Zähnezahl so definiert ist, dass in allem untersuchten Eingriffsposition in beiden Seiten minimum 1 nicht belasteter Nachbarzahn liegt.

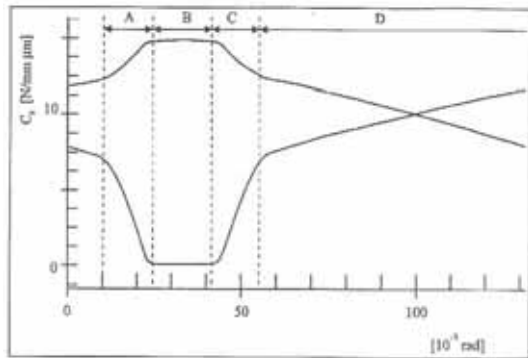
Mit dem früher schon erwähnte Einfluß auf die Zahnfedersteifigkeit von der Wechselwirkung hat Wanderer [8] sich ausführlich beschäftigt. Er hat als Beispiel-Verzahnung eine gerade Verzahnung mit 1.6 Profilüberdeckung ausgewählt. Er hat die Wechselwirkung durch Nebeneinflußzahlen berücksichtigt. Die aus der FE-Rechnung erhaltenen Verformungsdaten sind auf die Wirkunglinie projiziert.



5. Bild: Einzelsteifigkeitsverlauf ohne Berücksichtigung der Wechselwirkung [8]

Er hat bestimmt, dass dieser Verzahnung die maximale Zahnfedersteifigkeit deutlich geringer als der anfache Additionswert der Einzelsteifigkeiten ist. Das Verhältnis in seinem Berechnung zwischen Minimal und Maximalwert liegt in der Nähe von 1,3. Dieser Wert

müsste aufgrund analytischer Berechnungen in der Nähe von 2 sein.



6. Bild: Einzelsteifigkeitsverlauf mit Berücksichtigung der Wechselwirkung [8]

Die Bilde zeigen die Ergebnisse von Petersen in Bestimmung der Einzelsteifigkeitsverlauf. Mit ohne Berücksichtigung der Nebeneinflüßzahlen hat er sehr ähnlicher Verlauf zur Berechnung nach Ziegler bekommen. In Gegensatz zeigt die Berechnung mit der Berücksichtigung der Nebeneinflüßzahlen bei der Lastübernahme des neuen Zahnpaars eine Steifigkeitsverkleinerung des bereits in Kontakt befindlichen Zahnpaars. Die Hintergrund des Effekts ist die Wechselwirkung zwischen den in Eingriff liegenden Zahnpaaren, infolge der zeigt das entlastete Zahnpaar nahezu gleiche Verformung bei weniger Kraftübertragung.

8. ZUSAMMENFASSUNG

In den vorherigen Abschnitten wurden die Berechnung der Zahnfedersteifigkeit und Verformung der evolventisch-aussenverzahnten, zylindrischen Zahnradpaaren präsentiert. Außerhalb der Übersicht der wichtigsten analytischen Methoden war die Verformungsverlauf durch das analytischen Berechnungsmodell nach Petresen erörtert.

Nach der Vorstellung der analytischen Möglichkeiten wurde das Potential der FE Analysen aufgewiesen. Hier war für die Feststellung die Arbeit zu Grunde gelegt.

Die FE Berchnungen hat normalerweise deutlich größeren Zeitaufwand, der in der Praxis oft nicht möglich ist. Die Vorschätzung des Einfluß der Wechselwirkung ist auf die Zahnfedersteifigkeits- und Verformungsverlauf ist sehr schwierig, deshalb gibt die Untersuchung der Abhängigkeit von verschiedenen Geometrien viele Möglichkeit. Die Analyse dieser Auswirkungen ist ein wichtiges Thema meiner künftigen Forschungen.

“The described article/presentation/study was carried out as part of the EFOP-3.6.1-16-2016-00011 “Younger and Renewing University – Innovative Knowledge City – institutional development of the University of Miskolc aiming at intelligent specialisation” project implemented in the framework of the Szechenyi 2020 program. The realization of this project is supported by the European Union, co-financed by the European Social Fund.”

LITERATUR

- [1] DIN3990-1 Tragfähigkeitsberechnung von Strinrädern - Einführung und allgemeine Einflußfaktoren, 1987.12.
- [2] ISO 6336-1 Calculation of load capacity of spur and helical gears - Basic principles, introduction and general influence factors, 2006.09.
- [3] Kagawa, T.: Deflection and Moments Due to a Concentrate Edgeloal on an Cantilever Plate of Finite Length, 11th Japan National Congress for Appl. Mech., 1961
- [4] Kamondi, L.: Eine Möglichkeit für die Reduzierung bei dem Kontakt der zylindrischen Zahnräder, OGÉT 2003 XI. Internationales Treffen von Maschinenbauingenieuren, Kolozsvár, 8-11.05.2003. S: 129-132.
- [5] Lutz, M.: Methoden zur rechnerischen Ermittlung und Optimierung von Tragbildern an Schneckengetrieben, Dissertation, TU München, 2000
- [6] Petersen, D.: Auswirkung der Lastverteilung auf die Zahnfußtragfähigkeit von hoch überdeckenden Stirnradpaarungen. Braunschweig: Institut für Konstruktionslehre, Maschinen- und Feinwerkelemente, Technische Universität Braunschweig, 1989
- [7] Schmidt, G.: Berechnung der Wälzpressung schrägverzahnter Stirnräder unter Berücksichtigung der Lastverteilung, TU München, Diss., 1973
- [8] Wanderer G.: Zahnfedersteifigkeit aus FE-ermittelten Einflußzahlen, TU München, Diss., 1994
- [9] Weber, C.; Banaschek, K.: Formänderung und Profilrücknahme bei gerad- und schrägverzahnten Rädern; Schriftenreihe Antriebstechnik 11, 2. Auflage, Braunschweig, 1955
- [10] Ziegler, H.: Gesamt-Zahnfedersteifigkeit und Lastverteilung schrägverzahnter Stirnräder, TH Aachen, Diss., 1971

IPARI TERMÉK- ÉS FORMATERVEZŐ MÉRNÖK HALLGATÓK KIÁLLÍTÁSÁNAK SZERVEZÉSI TAPASZTALATAI

EXPERIENCE FROM EXPOSITION OF INDUSTRIAL DESIGN ENGINEERING STUDENTS

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

ABSTRACT There was an opening ceremony of the exposition of Industrial Design Engineering students and the Institute of Machine and Product Design on 13 April 2018 in the Gallery of Miskolc (Ottó Herman Museum). This article shows some information about this act and the experience of the preparation.

1. BEVEZETÉS

Az ipari termék- és formatervező mérnök hallgatóknak és a Gép- és Terméktervezési Intézet munkatársainak lehetősége nyílt a Herman Ottó Múzeum - Miskolci Galériában való megjelenésre. Az elkészült kiállítás megnyitójára 2018. április 5-én, csütörtökön 17 órakor került sor. A cikk a kiállítás létrejöttének főbb feladatait és állomásait mutatja be.

2. ALAPÖTLET

A Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Gép- és Terméktervezési Intézete gondozza az Ipari termék- és formatervező mérnök alapszakot. Az itt tanuló hallgatóknak számos féléves tantárgyuk elismeréséhez szabadkézi rajzokat, 3D látványterveket, modelleket, maketteket illetve a szakdolgozat-készítés során komplett terv- és termékdokumentációkat kell készíteni. Ezen munkák közül gyakran születik kidolgozottságát és műszaki háttérét tekintve is kiemelkedő eredmény, melyek érdemesek lehetnek egy kiállításon való bemutatásra. A Miskolci Galériában való megjelenés ötletét 2017 végén Dr. Kavecsánszki Gyula DLA az egyetem címzetes egyetemi tanára vetette fel, aki a kiállítás szervezésében és a megjelenő anyag létrehozásában is fontos szerepet vállalt. Kollégánk jó kapcsolatot ápol a Miskolci Galéria munkatársaival, ami lehetővé tette, hogy

a II-es számú nagy kiállítótermüket a 2018-as évre előre ütemezett formában rendelkezésünkre bocsássák. A tervek megvalósulását az is segítette, hogy egy ilyen esemény a Miskolci Egyetem és Miskolc Megyei Jogú Város kapcsolatát is tovább erősíti, hiszen egy ilyen belvárosban megjelenő egyetemi bemutatkozás nagyobb közönséghez juthat el, mintha az egyszerűen csak a Miskolci Egyetemváros területén kerülne megrendezésre.

3. FINANSZÍROZÁS

A Miskolci Egyetemen 2017. májusában indult el a „TUDÁS-VÁR a Miskolci Egyetem” című EFOP-3.4.4-16-2017-0008 azonosítószámú projekt, melynek fő célja a pályaorientáció, valamint a matematikai, természettudományos, informatikai, műszaki szakok népszerűsítése a felsőoktatásban, továbbá a felsőoktatási képzettségi szint növelése, a felsőoktatásba való bekerülés fokozása.

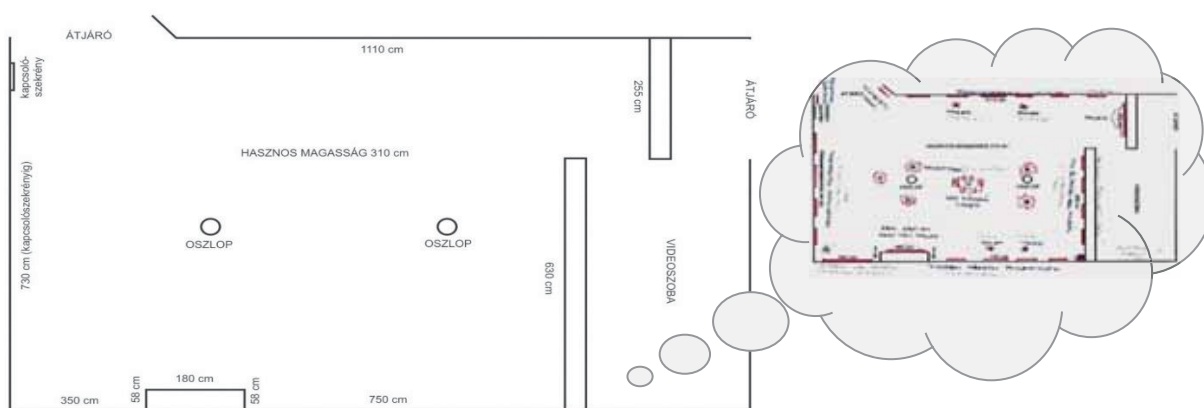
Egy ilyen kiállítás ötletében az érintett projektvezetők is hamar meglátták a Miskolci Egyetem MTMI szakjain folyó képzés promóciójának lehetőségét, így már röviddel a felvetése után ígéretet kaptunk arra, hogy a bemutatandó anyag elkészülésére pályázati forrásból rendelkezésre áll majd a szükséges anyagi fedezet. Ebbe beletartozott a Gép- és Terméktervezési Intézet által összeállított poszterek grafikai és nyomdai előkészítésének, nyomtatásának és vastag hordozófelületre történő kasíroztatásának anyag- valamint munkaköltsége, illetve a 3 dimenziós nyomtatással újonnan elkészülő modellek és makettek alapanyagköltsége is.

A projekthez kapcsolódóan a Miskolci Egyetemet és annak karait bemutató poszterek is készültek, melyek a fő kiállító térhez tartozó videoszobában kerültek elhelyezésre.

4. HELYSZÍN

A kiállítás sikerének egyik kulcsa a jól elosztott, zsúfoltságtól mentes, átlátható és érthetően tematizált berendezési terv. Ennek tudatos tervezése már az ötlet kibontakozásakor elkezdődött fejben, majd az intézeti értekezletek során egyre jobban körvonalazódott, hogy milyen típusú hallgatói munkákat és mely tanszéki/intézeti ipari projekteket lehetne bemutatni. Kezdetektől fogva fontos célunk volt, hogy felhívjuk a figyelmet az Ipari termék- és formatervező mérnök alapszakra, a nálunk megszerezhető készségekre és ismeretekre, hiszen tudtuk, hogy a Miskolci Galériába több helyi és vidéki középiskolából is várhatók látogatói csoportok. A különböző témájú

poszterek és makettek számát és méretét befolyásolta a kiállítási anyag tervezett súlyozása, vagyis hogy mire kívánjuk felhívni a figyelmet, de kis mértékben a rendelkezésre álló anyagok mennyisége is hatással volt a végeredményre. Előzetesen természetesen jóval több kiállítandó anyag került a látótérbe, mint ami végül valóban megjelenhetett a megnyitó napján, hiszen mindvégig a minőségi megjelenés volt a cél, nem pedig a mennyiség. A darabszámot befolyásolta a kiállítótér mérete és tagoltsága is, melyet jó előre felmértünk. Az eleinte különböző méretűre tervezett poszterek végül – néhány kivételtől eltekintve – egységesen 3:4 arányúak és 900mm×1200mm méretűek lettek. (1.ábra.)



1.ábra. A Miskolci Galéria kiállítóterme és a kiállítás első elrendezési tervezete

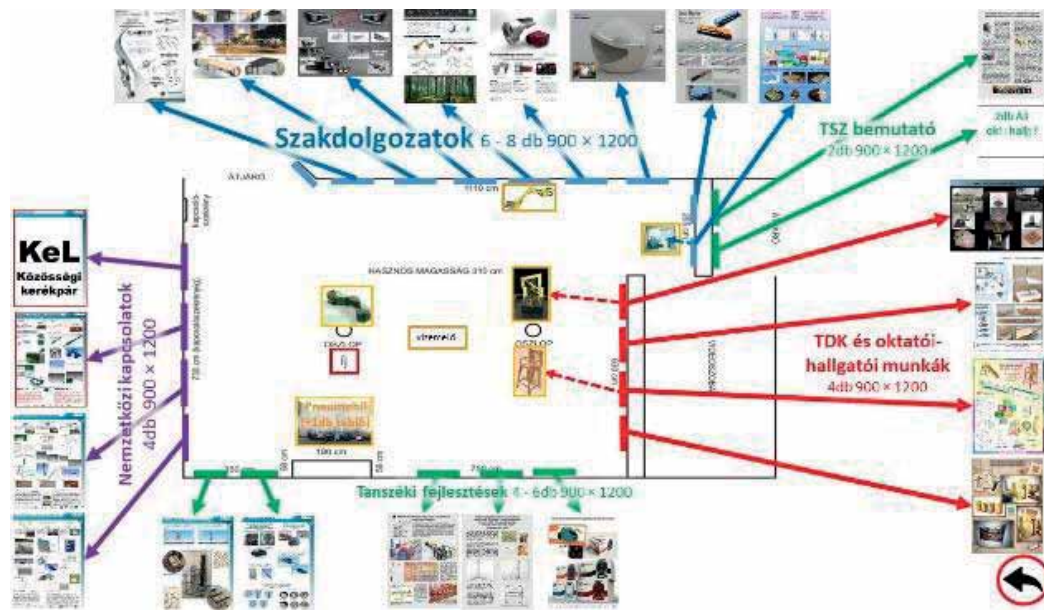
5. KIÁLLÍTÁSI ANYAG

A kiállításon a hallgatói munkák sorában az Integrált terméktervezés I-II-III-IV valamint Szakdolgozatkészítés c. tárgyak keretében született eredmények mellett Tudományos Diákköri dolgozatok és Nemzetközi hallgatói projektek poszterei és makettjei is helyet kaptak. Emellett a régebbi és a legújabb tanszéki ipari fejlesztések is megjelentek bemutatva a szakot gondozó intézeti háttérrel.

A kiállítható minőségű hallgatói eredmények összegyűjtése a kiállítás szervezésének fontos részét képezte, hiszen nem egy már meglévő anyagot terveztünk bemutatni, hanem egy alapjaiban új kiállítást kívántunk létrehozni. Első lépésként intézeti értekezleteken tehetek a kollégák javaslatot az általuk oktatott vagy konzultált – legtöbb esetben már végzett – hallgatóik bemutatható eredményeire vagy látóterükbe került egyéb színvonalas munkákra. Az ezekhez kapcsolódó anyagok beszerzése minden esetben az adott anyaghoz köthető kolléga feladata volt. Akár

tárgyfelelősként, kurzus oktatóként vagy épp témavezetőként került kapcsolatba az érintett fiatal formatervező mérnökkel, személyesen vagy levélben megkereste és tájékoztatta a kiállítási lehetőségről. A felkérést minden érintett örömmel vette és a többség aktívan részt is vett a saját poszterének határidőre történő elkészítésében.

A tervezés első fázisában úgy tűnt, hogy az egyetemi tanulmányok során beadandó feladatok és a szakdolgozatvédéskor a hallgatók által leadott poszterek alkalmasak lesznek a bemutatásra. Legtöbb esetben mégis át kellett gondolni ezen elektronikus rendelkezésre álló vagy a szervezés során a hallgatóinktól bekért anyagok a kiállítás filozófiájának megfelelő átalakítását, egyszerűsítését. Ezen szerkesztési munkákat a hallgatók és az érintett kollégák vegyesen végezték. Az elkészült posztereket Dr. Dömötör Csaba, a kiállítás intézeti felelőse gyűjtötte és rendszerezte. Az értékelésük az intézeti értekezlet feladat volt.



2.ábra. A kiállítandó anyag elrendezési terve

Egyes poszterekhez fa, agyag, gipsz, papír, stb. modellek is tartoztak, de készültek 3D technológiával nyomtatott új makettek illetve prototípusok is. Az ezekhez szükséges CAD modelleket szintén az intézeti kollégák bocsátották rendelkezésre vagy készítették el. Az alapanyagok beszerzése valamint a nyomtatási feladatok elvégzése Dr. Bihari János kollégánk feladata volt.

A kiállítási anyag mennyisége és tartalma az idő előrehaladtával egyre jobban körvonalazódott, így pontosítani tudtuk azok elhelyezését a kiállítóterben. De a feladat jellegéből fakadóan mindvégig szem előtt kellett tartanunk azt, hogy a valódi installáció csak a kiállítás berendezésének napján véglegesedhet. (2.ábra.)



3.ábra. A kiállítás meghívója

6. LOGISZTIKA

A kiállítási anyag alapvetően plakátokból és kisebb-nagyobb modellekből állt. A felkasírozott poszterek nyomdából való szállításáról a Miskolci Egyetem Kommunikációs Csoportjának munkatársai gondoskodtak.

Az egyetemről illetve később az egyetemre vissza már a Miskolci Galéria autójával tudtuk eljuttatni a teljes kiállítási anyagot. A berendezés során megtérült az addig befektetett tervezési munka, hiszen az anyag

gond nélkül elhelyezhető volt a rendelkezésre álló területen. A múzeum addigra előkészítette a kért posztamenseket és vitrineket így az összeállított anyag rövid idő alatt végleges helyére kerülhetett. (4.ábra.)

A kiállításához a Miskolci Galéria munkatársai meghívót és plakátot is készítettek. (3.ábra.) A látogatóközönség szervezése is az ő feladatuk volt, de több velünk kapcsolatban álló miskolci középiskolába mi is elvittük a kiállítás hírét.



4.ábra. A kiállítás a megnyitó előtt

7. MEGNYITÓ

A kiállítást Prof. Dr. Torma András a Miskolci Egyetem rektora és Vadászné Dr. Bognár Gabriella a Gép- és Terméktervezési Intézet igazgatója nyitotta meg, de jelen volt Dr. Siménfalvi Zoltán a Gépészmérnöki és Informatikai Kar dékánja is. A látogatók között az egyetem és az intézet jelenlegi és volt munkatársai, hallgatóit is üdvözölhettük. Az eseményről tudósított a Miskolci Televízió.



5.ábra. A megnyitó látogatói

8. A KIÁLLÍTÁS UTÓÉLETE

Az egyetemre történő visszazállítását követően a poszterek az intézet gondozásában lévő rajztermekbe kerültek, ahol például a ipari

termék- és formatervező mérnök alapszakra jelentkezőknek is bemutattuk már az alkalmassági vizsga napján. Összességében elmondható, hogy egy sikeres vállalkozás áll mögöttünk, melyből sok tapasztalatot szereztünk.

9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kiállítás nem jöhetett volna létre az intézet hallgatóinak és kollégáinak munkája nélkül, de mind a Miskolci Galéria, mind pedig az Miskolci Egyetem Kommunikációs Csoportja is nagy mértékben járultak hozzá a sikeres lebonyolításhoz. Köszönet mindannyiuknak! A kiállítás 2018. május 13-ig volt megtekinthető.

"A cikkben és előadásban ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg"



6.ábra. A Gép- és Terméktervezési Intézet munkatársai és hallgatói a megnyitó napján

AZ IPAR 4.0 ÉS AZ EGYEDI ORVOSI IMPLANTÁTUMOK KAPCSOLATA

RELATIONSHIPS BETWEEN THE INDUSTRY 4.0 AND THE INDIVIDUALIZED MEDICAL IMPLANTS

Dr. Ficzer Péter, PhD, ficzere@kge.bme.hu

ÖSSZEFOGLALÁS (ABSTRACT).

Nowadays, we are talking about industry 4.0 more and more. There is much to hear about why it is worth introducing, what are the benefits and disadvantages. In fact there are new areas of research and development where practically - in order to achieve the results - we are almost unconsciously forced to industry 4.0. Such an area is the design and manufacture of customized medical implants.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban egyre többet hallani a negyedik ipari forradalomról, annak hasznáról, fontosságáról, várható következményeiről. Tanulmányok készülnek a különböző területeken történő bevezethetőségéről. A gőzgépek, a szerelőszalagok és az automatizáció után most a negyedik ipari forradalom épp napjainkban zajlik. Ahogy a korábbi ipari forradalmaknak, az ipar 4.0-nak is a fejlődés a célja, a résztvevő cégek versenyképességének növelése, melynek egyik fő alappillére kétségtelenül a tervezési és gyártási folyamatok optimalizálása. Az ipari forradalmak mozgatórugója nem más, mint a termelékenység és a hatékonyság növelése: ez a korábbi három ipari forradalom esetében is megegyezett, a meglévő erőforrásainkkal egyre többet akartunk termelni [1]. A korábbi ipari forradalmak során mindig jött egy új technológia, ami miatt sokan elvesztették állásukat. Emiatt ma már meglehetősen nagy az ellenállás minden jelentősebb újítással szemben. Ugyanakkor az is látszik a korábbiakból, hogy az ipari forradalmak - a nagyobb termelékenység mellett - fel tudták szívni a munkaerőt, igaz általában magasabb szintű, összetettebb munkát kapott az ember, míg az egyszerűbbeket, monotonabbakat „kapta meg” a gép [2]. Ennek hatására a munkaerőigények is jelentős változáson mennek át. Az ipar 4.0-át jellemző digitalizáció egészen más készségeket és képességeket helyez előtérbe és a munkakörök is átalakulnak. Az ipar munkaerőigénye átalakulóban van, de ez a változás nem feltétlenül érint minden ágazatot azonos

mértékben és időben. Bizonyos ágazatok esetében ez a folyamat már jóval előrébb tart, azonban egészen biztosra vehető, hogy a kékgalléros ipari tevékenységeket, különösen a repetitív munkaköröket átveszik a robotok. A nagyobb hozzáadott értékű, innovatívabb munkák maradnak meg az emberek számára, lényegesen magasabb technológiai felkészültségű szakértelmet igényelve. A munkahelyek pedig, amelyek ily módon létrejönnek, lényegesen nagyobb hozzáadott értéket termelnek [3]. Olyan helyeken, ahol az emberek számára nehéz vagy veszélyes lenne a munkavégzés, jelenleg is nélkülözhetetlen a robotok kiegészítő használata. A gépek ellenállóbban viselkednek az ember számára nem megfelelő környezeti körülmények között is. A teherbírás és az ellenállóképesség mellett a gépek pártjára áll az is, hogy az emberi munkaerő csak több műszakban képes folyamatosan ellátni a munkát és a cégen kívüli szabályrendszerek biztosítják a kötelező pihenőidőt. A robotok számára nem szükséges a pihenőidő megadása, tetszés szerint indítható és leállítható az adott gyártási egység működése, csak a karbantartási leállásokra szükséges ügyelni [1]. Az informatika mindenhova be fog szivárogni és azok az emberek képezik majd a legértékesebb munkaerőt, akik egyszerre értenek az adott szakterülethez és az infokommunikációhoz is. [3]. Természetesen a megfelelő infokommunikáció megvalósításához folyamatos internetkapcsolatra van szükség, ami egyben jelentős mértékű veszélyt is jelent. Mindennapossá válik a felhőhasználat, a felhőalapú adattárolás és megosztás. Ez tulajdonképpen már ma is életünk része (gmail, Dropbox, GoogleDrive). Az iparban is mindennapossá válik a virtuális valóság, ami már szintén része mindennapi életünknek (pokémon go). Az ipar 4.0 a korábbi ipari forradalmaknál gyorsabban fog lezajlani a jobb, széleskörűbb kommunikációs eszközöknek köszönhetően. További előnye lehet a digitalizációnak, hogy a határidők és a fejlesztési fázisok átláthatósága, a CAD adatok tárolása egyszerűsödik. Virtuális

üzembhelyezés (emuláció), ügyféligényekhez illesztett termelés, valamint az emberek és a technológia magas szintű együttműködése jellemzik az ipar 4.0-t. A heti 7 napos, napi 24 órás világszerte megosztott gyártás az igényeknek és a követelményeknek megfelelően optimalizált erőforrás kihasználtsággal működik. Az átfogó, valós idejű, földrajzi határok nélküli adatgyűjtéssel és -kiértékeléssel együtt a gyártásellenőrzés és az azonnali beavatkozás lehetőségei is bővülnek. A digitalizálás és a mesterséges intelligencia korába érve lehetőségünk nyílik arra, hogy egy termékötletet már a legelső tervezési fázisokban teszteljünk, és idejében megtapasztaljuk az esetleges kockázatokat és kritikus pontokat. Korábban ez nem így volt, értékes munkaóra-, alapanyag- és egyéb erőforrás mennyiséget volt szükséges beleölni egy termékfejlesztési folyamatba. A digitalizáció a termékfejlesztés szempontjából az utóbbi évtizedek legnagyobb eredménye, jelentősen lerövidíti a termék életútját az ötlettől a sorozatgyártásig, és nagyban megkönnyíti a későbbi karbantartást is. A 3D nyomtatók megjelenése olyan mérnöknek számít, ami nemcsak a későbbi gyártás folyamán nyújtja az alapokat, hanem már az ötlet szintjén elkezdhető vele a tesztelés. Akár néhány óra alatt létrehozható vele egy prototípus vagy egy alkatrész. Ez azt jelenti, hogy nem szükséges egészen a gyártásig elvinnünk egy terméket, ha már a kezdeti szakaszokban megismerhetjük a korlátokat, és az azonnali visszajelzések alapján módosíthatjuk a terveket [1]. Az ipar 4.0 számtalan formában kapcsolódik a 3D nyomtatáshoz, úgy mint:

- Újszerű konstrukciós kialakítást tesz lehetővé
- Tömegcsökkentés lehetősége
- 3D nyomtathatóság ellenőrzése a 3D CAD tervezőrendszerben → megfelelő kialakítás már a tervezés során
- CAD rendszerrel asszociatív rács (kitöltés, támaszanyag)
- Korábban RPT (Rapid Prototyping), ma AM (Additive Manufacturing). Nem véletlen a névváltozás, ma már kisebb sorozatok esetén közvetlen gyártás.
- 3DP növeli a kreativitást
- 3DP lesz a gyártó gépek 50%-a 2020-ra
- Buborék nyomtatása a falba → nem kell hőszigetelés
- Szálerősítéses anyagok nyomtatása
- A 3DP minden területre betör → ez az ipar 4.0 szimbóluma

- Hibrid gyártógépek: additív és szubtraktív technológiák együttesen, azaz 3DP és forgácsolás egyben. DMG Mori 5-tengelyes megmunkáló központot úgy forgathatjuk az asztalt, hogy nem feltétlenül kell támaszanyag.
- robotkar vezérléssel történő nyomtatás → korlátlan nyomtatási terület

Az ipar 4.0 esetében a tervezés fontos lépése a szimuláció.

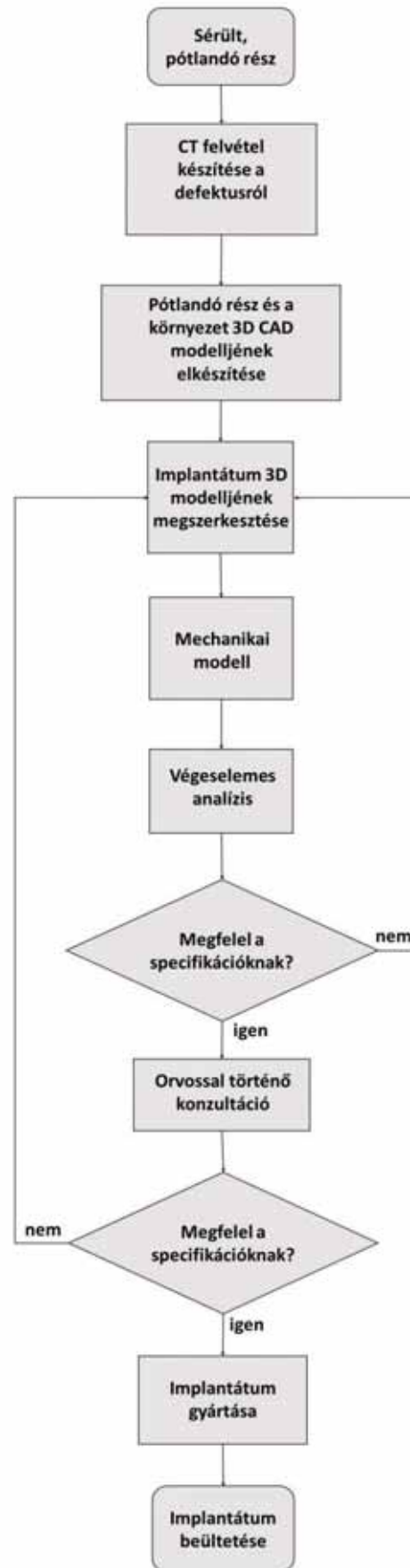
- A költségek 70%-a jelentkezik úgy, hogy az még konkrétan nem kapcsolódik közvetlenül a végleges db.-hoz.
- A szimulációnak önmagában semmi értelme → Optimalizálni szeretnénk, ennek egy lépése a szimuláció (a modellezés is)
- Ma már a teljes PLM folyamatot kell optimalizálni
- Felhő alapú szimuláció: Pre- és posztprocesszálas az én gépemen a megoldó pedig egy központi (nagyon erős) gépen megoldja. Ezalatt az én gépem „szabad” marad, lehet rajta dolgozni, ezáltal sokkal több és komplexebb szimuláció valósítható meg, egyszerre több variáció is futtatható [5], [6].

Fontos az ipar 4.0 gazdasági szempontú vizsgálata. Cél a kereslethez való igazodás. Átmenet nélkül az ipar 4.0 nem igazán megvalósítható egészében, de egyes részterületeken való alkalmazása is jelentős nyereséget eredményezhet. Az eredmények nem mindig fejezhetők ki pénzben. Az okos termékek ára magasabb, ez a profit a hozzáadott érték következtében. Az ipar 4.0 következtében a jövőben egyre kevesebb "kék galléros"-ra lesz szükség, viszont egyre több jól fizetett mérnökre. Felértékelődik a kreativitás, az adatok értelmezése és megfelelő felhasználása [7].

Az ipar 4.0, a digitalizáció számos területen nyitott új lehetőségeket. Az egyik ilyen terület az egyénre szabott orvosi implantátumok készítésének lehetősége. Ennek számos előnye van a sorozatban gyártott implantátumokkal szemben. Az előnyök ellenére a technikai nehézségek és a rendkívül magas költségek miatt csak ritkán alkalmazták [8]. A továbbiakban egy ilyen területen megvalósuló projekt esetében mutatom be az ipar 4.0 alkalmazásának elkerülhetlenségét.

2. IPAR 4.0 AZ EGYEDI ORVOSI IMPLANTÁTUM TERVEZÉSE SORÁN

Egy egyénre szabott orvosi implantátum tervezésének lépései láthatók az 1. ábrán. Egy ilyen folyamat megtervezése, előállítását során több szakmának kell folyamatosan együttműködni. Mivel a különböző területeken dolgozó szakemberek földrajzilag is különböző helyeken dolgoznak, így a digitális kommunikáció, a felhő alapú adattárolás biztosítása elengedhetetlen. Ehhez természetesen szükséges volt a megfelelő jogosultságok beállítása is. Fontos, hogy legyen egy közös felület, ahová a különböző szakterületen dolgozó kollégák feltölthetik az általuk elért eredményeket. Ezek az eredmények adott esetben a következő lépésnél egy másik szakterület képviselője számára azonnal biztosítja a részére bemeneként szolgáló információk elérését. Szükségszerű, hogy előre egyeztetett formátumokat, platformokat használjon mindenki, hogy az adatkonverziók során bekövetkező információvesztés minél kisebb legyen. Ehhez előre ki kell választani az alkalmazandó szoftvereket. Ezeken túl definiálni kell a határidőket, felelősöket, hogy a folyamat végén bekapcsolódó személyeknek is legyen elégséges idejük az adott részfeladatra. együttműködésre. Az első lépésben a sérült részről kell készíteni megfelelő CT felvételeket. Ennek a felvételsorozatnak a sűrűsége, minősége döntő mértékben befolyásolja a későbbi eredményeket, ezért a megfelelő szaktudás és előkészítés döntő fontosságú. Ezekből a DICOM formátumú állományokból kell előállítani a hiányzó résznek, valamint annak környezetének CAD modelljét. A meglévő részek rekonstruálása egyszerű, a hiányzó rész megalkotása viszont már komoly mérnöki modellező ismereteket igényel [9]. A CT felvételek alapján előállított geometria általában háromszögelt felületmodell (stl). Ez ugyan gyártásra alkalmas, de a geometrián bármilyen módosítás csak rendkívül nehézkesen megvalósítható. Mivel az implantátumot fémből, vagy műanyagból gyártják, így annak rugalmassága jelentősen eltérhet az eredeti csont rugalmasságától. Ez a későbbiekben tönkremenetelhez vezethet, ezért a csatlakozó felületek megtartása mellett a geometria belső részeit módosítjuk úgy, hogy adott terhelés hatására az implantátum az eredeti csonthoz közelítő mértékben deformálódjon [10], [11]. Ehhez a módosításhoz már jelentős anyagtudományi, mechanikai és szimulációs ismeretekre van szükség a legújabb topológia optimalizáláshoz alkalmas szoftverek mellett.



1. ábra. Egyénre szabott orvosi implantátum tervezésének lépései

Mivel a numerikus szimulációkhoz és az optimalizáláshoz a háromszögelt felületmodell nem igazán alkalmas, így azt még át kell alakítani valamilyen megfelelőbb CAD formátumra. Ehhez a napjainkban egyre több helyen használt új technológia az ún. reverse engineering ismeretére van szükség. Amennyiben mindezek után sikerült megtalálnunk a mechanikai szempontból megfelelő geometriai kialakítást, szükséges az orvossal is konzultálni, hiszen a műtéthez szükséges kialakítást is biztosítani kell. Mindezek után, ha minden megfelel, akkor lehet legyártani az implantátumot. Mivel ezek az implantátumok általában rendkívül összetett bonyolult geometriával rendelkeznek – adott esetben üreges kialakításúak – az esetek döntő többségében csak az additív gyártástechnológiával gyárthatók. Többnyire, ha elő is lehetne állítani valamilyen hagyományos, lebontó eljárással, az egyediség miatt olyan drága lenne, hogy inkább itt is a 3D nyomtatást szokták választani. Az additív gyártástechnológiák napi használata az utóbbi évtizedben vált napi gyakorlattá, azonban fontos megjegyezni, hogy a látszat ellenére ez is egy teljesen önálló tudományággá nőtte ki magát, jelentős rutint, szakértelmet és megfelelő, kreatív gondolkodásmódot igénylő feladat [12], [13]. Mivel ennek a gyártástechnológiának is vannak sajátosságai, a szimulációhoz jelentős mértékű gyártási- és anyagtechnológiai ismeretekre van szükség a modellező és szimulációs ismeretek mellett. A kényszerek megfelelő definiálása csak komoly anatómiai ismeretek mellett lehetséges. Szükséges továbbá a folyamatos konzultáció az orvossal is, hogy a szimuláció során a várható igénybevételek a lehető legnagyobb pontossággal legyenek megadhatók.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Az egyénre szabott orvosi implantátumoknak a méretsorozatban gyártott implantátumokkal szemben számos előnye van. Viszont az ilyen megoldásokhoz sokkal nagyobb tudásra, fejlettebb technológiák alkalmazására van szükség. Megállapítható, hogy egy ilyen projekt az ipar 4.0 vívmányai nélkül megvalósíthatatlan lenne. Ezek használatával a hozzáadott érték is jelentős mértékben növekszik. Cserébe tartósabb, megfelelőbb terméket tudunk előállítani.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A projekt a Nemzeti Kutatási és Innovációs Hivatal támogatásával az NKIH Alapból valósul meg, a projekt címe: Egyénre szabott orvosi biológiai implantátumok és segédeszközök új

generációs gyártási folyamatának kidolgozása additív technológiákra; a pályázat azonosító száma: NVKP_16-1-2016-0022.

5. IRODALOM

- [1] Orbán E.: Ipar 4.0 és ami mögötte van. ebook, 2018.
- [2] Turzó Á.: A ma ismert világot totálisan elsöpri a negyedik ipari forradalom. portfolio.hu, 2016. szeptember 20.
- [3] Munkaerő-piaci felkészülés az ipar 4.0-ra , Gyártástrend, 2016. augusztus IX. évf. 7-8. szám, ISSN1789-8935, pp 12-14
- [4] Radvány M.: Új időszámítás a gyártásautomatizálásban. Pneumatika, hidraulika, hajtástechnika, automatizálás 2018, 2018 április, Műszaki kiadványok szerkesztősége, ISSN 1587-6853, pp 3-12
- [5] Győri M., Ficzere P.: Use of Sections in the Engineering Practice. Periodica Polytechnica-Transportation Engineering 45:(1) pp. 21-24. (2017)
- [6] Ficzere P., Török Á.: Gépjárműalkatrészek biztonságkritikus optimalizálása. A Jövő Járműve: Járműipari Innováció 8:(3-4) pp. 66-70. (2013)
- [7] Bogdán Z.: Az ipar 4.0 -közgazdász szemmel. Innotéka, Viii. évfolyam, 2018 május, pp 17-21
- [8] Sós É.: Egyénre szabott protézis. Gyártástrend 2018. Január-Február XI. évfolyam 1-2. szám, pp 26-28
- [9] Győri M., Ficzere P. Increasing Role of Sections Caused by 3D Modelling. Periodica Polytechnica-Transportation Engineering 44:(3) pp. 164-171. (2016)
- [10] Ficzere P., Borbás L. Csontok anyagjellemzőinek közelítése a gyártástechnológiai paraméterek módosításával 3D nyomtatás esetén. Biomechanica Hungarica 10:(2) p. 22. (2017)
- [11] Ficzere P., Borbás L., Falk Gy. Orvosi implantátumok méretezéséhez szükséges anyagmodellek additív gyártástechnológiák alkalmazása esetén. Biomechanica Hungarica 10:(2) pp. 57-58. (2017)
- [12] Ficzere P., Borbás L., Szebenyi G. Reduction possibility of residual stresses from additive manufacturing by photostress method. Materials Today: Proceedings 4:(5) pp. 5797-5802. (2017)
- [13] Borbás L., Ficzere P. Kérdőjelek az additív gyártástechnológiákban (maradó feszültségek polimerek nyomtatásakor). GÉP LXVIII:(2) pp. 5-10. (2017)

Csontokról készített CT felvételektől a CAD geometriáig

From CT scan to the CAD geometry

*Bogya Péter egyetemi hallgató, Dr. Ficzer Péter egyetemi adjunktus, Dr. Horváth Eszter egyetemi adjunktus, Dr. Lovas László egyetemi docens, BME Járműelemek és Jármű-szerkezetanalízis Tanszék
bogyapecoer@gmail.com*

ABSTRACT

Human bone replacement may be required by many cases because of they radical defects. By development of additive manufacturing can causes that produce customized implants will replace the traditional fix size ones. This write shows some steps of a possible way to design costumized implants, mainly with image processing and 3D modeling.

1. BEVEZETÉS

Az additív gyártástechnológiák egyre rohamosabb fejlődése és költségeinek csökkenése révén egyre inkább elérhetővé válnak a rétegről-rétegre építkező, eddig inkább csak a gépiparban prototípus gyártásra alkalmazott, összefoglaló néven úgynevezett 3D nyomtatásos módszerek az élet minden területén [1]. Így az orvostudomány részéről is megjelent az igény ennek hasznosítására [2].

Csontok pótlására számos sebészeti beavatkozás során szükség lehet azok súlyos defektusa miatt. Napjainkban még jellemzően sorozatgyártott implantátumokat alkalmaznak, melyek csak egy bizonyos méretsorozatban készülnek. Adott esetben a páciensnek méretben legmegfelelőbb darabot választják ki és ültetik be. Azonban szélsőséges esetekben a páciens anatómiai- vagy a defektus sajátosságaiból adódóan ezek a sorozatgyártott implantátumok csak nehezen vagy egyáltalán nem használhatók. Itt merült fel az igény, hogy a sorozatgyártott példányoktól eltérjünk és egyedi implantátumokat alkossunk meg. Ezen egyedi implantátumok jobban reprezentálják az eredeti csont geometriákat, illetve a tervezés során tetszőlegesen módosítható a modell, hogy majd a kész implantátum minden szempontból megfelelő legyen [3].

Hagyományos implantátumok legtöbbször biokompatibilis korrózióálló acélból vagy titánötvözetből készülnek. Az ilyen csontpótlások mechanikai jellemzői az anyag és a kötött geometriai igények miatt nagyban eltérhetnek az emberi csontétól. A beültetéstől

számítva az idő előrehaladtával ez a nagymértékű különbség az implantátummal kapcsolatban lévő csontok károsodásához, továbbá ez a károsodás visszahatva az implantátum kilazulásához vezethet és annak szükségszerű cseréjét eredményezheti. Ebből látható, hogy nem csak a defektusok jellegéből adódóan lehet szükség egyedi implantátumokra, az additív gyártástechnológiák lehetővé teszik sokkal kedvezőbb mechanikai tulajdonság elérését is. Így az eredeti csontot, anyagjellemzőiben jól megközelítő implantátum gyártható. [4] Ezért ezeknek az implantátumoknak a számítógépes 3D modelljét úgy kell kialakítani, hogy a modellalkotás után végeeselemes vizsgálat is végezhető legyen rajta és annak eredménye alapján szükség szerint módosítani tudjunk a modellen, ha az túlságosan nagy mértékben eltér az eredeti csont mechanikai tulajdonságaitól [5]. Az eredeti csont anyagjellemzőire legtöbbször csak becslésekkel élhetünk mivel azok a kortól, egészségi állapottól és a csont típusától is függhetnek. [6]

2. FOLYAMAT

Az egyedi implantátumok tervezése és gyártása több lépcsőből áll, melyek közül ez a cikk a pótlandó csont 3D modelljének megalkotásával és ezután annak egyszerűsítésével, vagyis az implantátum tervezésével foglalkozik.

3. 3D MODELL ALKOTÁS

3.1. CT felvétel a defektusról

A 3D-s modellalkotáshoz szükséges bemeneti információt esetünkben egy CT (Computed Tomography) vizsgálat felvételei adják. A vizsgálat tárgya egy idős hölgy egyik kézfejből eltávolított erősen csonttrikulázos human metacarpale. A vizsgált csonttól CT berendezés segítségével készített DICOM állományokat tudjuk felhasználni a 3 dimenziós modell megalkotásához.



1. ábra. A human metacarpale elhelyezkedése a kézfejen

Ezek a fájlok megjelenítve szürkeárnyalatos rétegfelvételek, ahol az egyes képpontok a vizsgált szegmentum adott pontjára jellemző gyengítési értéket tárolják. A fájlok tartalmaznak egyéb adatokat is, melyek a vizsgált paciensre, illetve a rétegek távolságára és a képeken látható objektumok méretére utalnak. A legtöbb szövettípus különböző gyengítési értéktartományt képvisel. [7] Így DICOM állományok képi fájlformátumba való átalakítása után képfeldolgozási módszerekkel a vizsgált szövet, jelen esetben csont egyszerűen elkülöníthető környezetétől, hogy aztán modellt alkothassunk belőle.

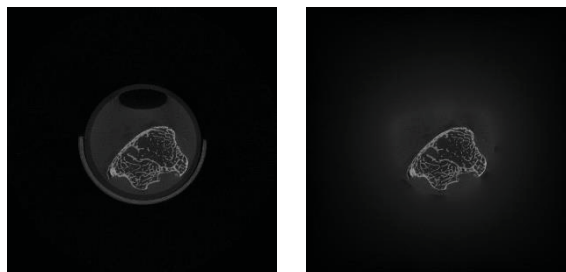
3.2. Képfeldolgozás MATLAB-ban

A CT felvételekből készített képállományok feldolgozása a MATLAB program segítségével történt, mely a mérnöki használat egyik legsokoldalúbb speciális programrendszere.

A MATLAB alkalmas arra, hogy egy benne megírt programnak megfelelően automatikusan, bármilyen beavatkozás igénye nélkül egyesével beolvassa és feldolgozza az rétegfelvételeknek megfelelő képeket. A program automatikus futása azért lehetséges, mert az egyes képek egy felvételtől származnak így képpontban meghatározott méretük és az egyes képpontok - meghatározott irányokban - egymástól való távolsága azonos. Továbbá nevük rendszerezve van és az egyes rétegek közti távolság is azonos. Ez egyben azt is jelenti, hogy szinte minden esetben, ha egy új CT felvétel feldolgozását kívánjuk megkezdeni, akkor az előzőekben felsorolt bemeneti paramétereket át kell írni a programban.

A program - a képekkel sorban haladva - egyesével olvassa be és dolgozza fel azokat. A beolvasás után az egyes képek egy 2 dimenziós mátrix formájában tárolódnak, ahol a mátrix minden eleme egy-egy képpontnak feleltethető meg. Innentől a feldolgozási műveletek is ezeket a mátrixokat használják.

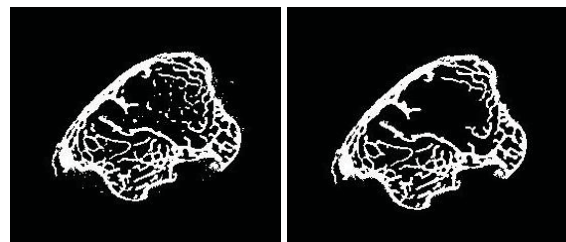
A feldolgozás első lépése a maszkolás, a csont körüli nagyobb intenzitású részek eltávolítására. Ennek érdekében egy sokszöget definiálunk a csont köré, mely egy maszkot alkot és az ezen kívül eső pixeleket megváltoztatjuk.



2. ábra. Bal oldalon egy beolvasott eredeti kép, jobb oldalon a maszkolás utáni kép

A következő lépésben binarizáljuk a képet melynek következtében a 2 dimenziós mátrix csak egyeseket és nullákat fog tartalmazni, ahol egy-egy képpontról egy meghatározott intenzitási határ alapján döntünk, hogy mivé alakítjuk.

A 3. ábra bal oldali képén jól látható, hogy a binarizálás után sok kis apró folt is maradt a képen. Ezeket az apró kis foltokat eltüntetjük, hogy később a 3 dimenziós modellnél ne legyenek kis lebegő szemcsék a csont modellje körül.

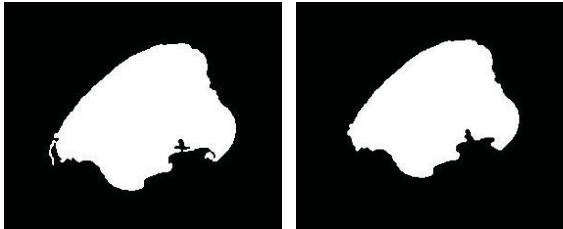


3. ábra. Bal oldalon a binarizálás utáni kép a, jobb oldalon a kis objektumok kiszűrése utáni kép

Habár az eredeti geometriát a 3. ábra jobb oldali képe közelíti meg leginkább, az ezekből a képekből előállított modellt még fejlett 3D-s nyomtatással is nehezen lehetne előállítani, ráadásul a végeselemes szimulációkat ezen a modellen lehetetlen lenne elvégezni [8]. Így a szilárdsági tulajdonságait nem lehetne előre meghatározni. Ezért a következő lépésben - a külső geometria megtartása mellett - a belső részek leegyszerűsítése a fő szempont, amit az úgynevezett lyukak feltöltésével érünk el.

A lyukak feltöltésének eredményét a 4. ábra bal oldali képe mutatja.

Ezután még egy alaktani változtatást alkalmazunk, melynek szemmel látható eredménye a csontszemek területének egyenletesebbé válása.



4. ábra. Bal oldalon a lyukak feltöltése utáni kép, jobb oldalon a 'simított' területtel rendelkező kép

3.3. Felületmodell előállítás MATLAB-ban

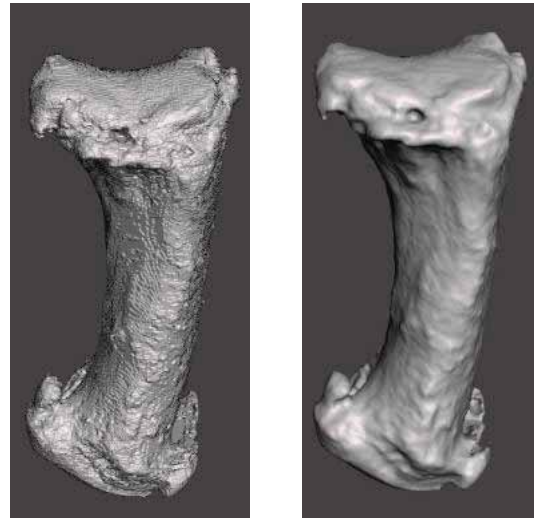
Egy darab kép feldolgozásának eredményét a 4. ábra jobb oldali képén láthatjuk. Az ábra ugyan képként megjeleníthető, azonban ez még mindig egy kizárólag bináris számokból álló kétdimenziós mátrix. Az összes kép feldolgozásából származó kétdimenziós mátrixokat egymásra pakolva egy háromdimenziós mátrixot kapunk. A háromdimenziós mátrixokon kívül még szükség van 3 darab speciális vektorra is, melyek az x, y, z irányokban a mátrix egyes rétegeinek normális irányú távolságát határozza meg egy tetszőlegesen bázisnak választott ponttól.

Most már minden adott, hogy a csontról elkészítsük a felületmodellünket. Az adatokat behívva egy másik MATLAB program képes felületmodellt, azaz STL típusú fájlt kimenetként generálni. Az így készült felületmodellt mutatja be a 5. ábra bal oldali képe.

4. A MODELL ÁTALAKÍTÁSA

4.1. Hibák javítása

A létrehozott modell ebben a formájában még sok hibát tartalmazhat. Ezek lehetnek: a réteges felépítésből származó enyhe szögletesség, a csonttól elkülönülő lebegő objektumok, amelyek nagyobb méretük miatt nem lettek kiszűrve a képfeldolgozás során, a képfeldolgozás hibáiból adódó nem az eredeti csont részét képező kitüremkedések, a felület nyitottsága, zárványok a csont belsejében. Ezeket az esetleges hibákat javítjuk.



5. ábra. Az eredetileg előállított- (bal oldalon) és a javított felületmodell (jobb oldalon)

4.2. Testmodell megalkotása

Általánosságban a felületmodellek nem alkalmasak a végeleemes szimulációk elvégzéséhez, így azokat valamilyen tömör test modellé kell konvertálni. Az így kapott solid modell a felületmodell hálózásának megfelelő háromszögelt felülettel rendelkező test modell.

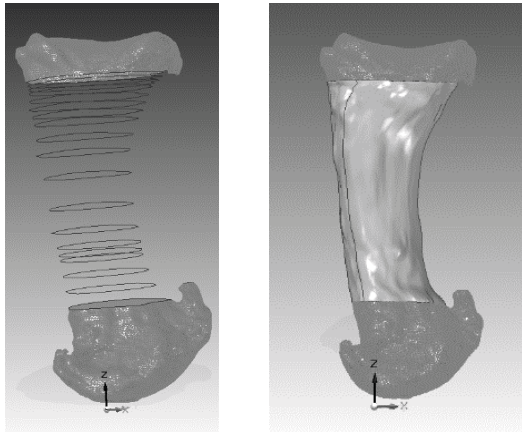
Ez a modell már alkalmas is lehetne a végeleemes modellezésére, viszont mivel a felületet felépítő háromszögek nagyon kicsik a végeleemes szoftverben csak nagyon kicsi elemmérettel lehetne behálózni. Továbbiakban ez azt is okozná, hogy nagyon sok számítást kell végeznie a szoftvernek, ami sok időt és számítógépes erőforrást igényel. Ezt elkerülendő egyszerűsítjük a modellt.

4.3. Modell egyszerűsítés

A modell egyszerűsítésére egy lehetséges módszer, hogy a modellt megfelelő helyeken elmozdítva a keresztmetszeteket egy NURBS típusú görbével helyettesítjük. A megalkotott görbéken keresztül úgynevezett átvezetett kihúzást végzünk el. Így újra alkotjuk a modell egy részét, aminek már nem háromszögelt a felülete [3].

Az átvezetett kihúzás arra azonban nem alkalmas, hogy két vagy több irányba elágazzon. Ezt kiküszöbölendő a modell azon részét, ahol ilyen előfordulna a kis felületháromszögek összevonásával és újradefiniálásával egyszerűsíthetünk majd a külön elágazásokra újból alkalmazható az átvezetett kihúzás módszere. Az így kapott modelleken - a jóval egyszerűbb felületi geometriájuk révén-

könnyebben végezhető el egy végelelemes analízis.



9. ábra. Bal oldalon az egyesével megrajzolt görbevonalak, jobb oldalt pedig már a göbék által újraalkotott modell

Az egyszerűsítés után kapott geometria, a gyártás után gyakorlatilag alig tér el az eredeti geometriától, ahogy ez a 10. ábrán is látható. Ez azt jelenti, hogy az egyszerűsített geometria kezelhetőségben jelentős mértékben javult, míg az egyszerűsítések során történt információvesztés (alaki eltérés az eredeti geometriától) szinte jelentéktelen.



10. ábra. Az eredeti és az egyszerűsített geometria a nyomtatás után

5. ÖSSZEGZÉS

Egy személyre szabott csontpótló implantátum tervezésének korai szakaszában a képfeldolgozás lehetőséget biztosít arra, hogy a külső geometria megtartása mellett szabadon alakítsuk a felvételeket még a modellalkotás

előtt. Majd a testmodell NURBS görbékkel történő leírása egy jó módot szolgálhat annak egyszerűsítésére.

6. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A projekt a Nemzeti Kutatási és Innovációs Hivatal támogatásával az NKIH Alapból valósul meg, a projekt címe: Egyénre szabott orvosi biológiai implantátumok és segédeszközök új generációs gyártási folyamatának kidolgozása additív technológiákra; a pályázat azonosító száma: NVKP_16-1-2016-0022.

7. IRODALMAK

- [1] P. Ficzer, L. Borbás, Á. Török. Economical Investigation Of Rapid Prototyping. International Journal for Traffic and Transport Engineering 3:(3) pp. 344-350. (2013)
- [2] Ficzer P., Borbás L. Gyors prototípus anyagok orvosi alkalmazásának lehetőségei, kérdései. In: Borbás Lajos (szerk.). Korszerű anyagok és gyártástechnológiák alkalmazása a gyógyászatban. Konferencia helye, ideje: Tatabánya, Magyarország, 2014.05.30-2014.05.31. Magyar Biomechanikai Társaság, 2014. p. 17. (ISBN:978-963-88981-2-8)
- [3] Györi M., Ficzer P. Increasing Role of Sections Caused by 3D Modelling. Periodica Polytechnica-Transportation Engineering 44:(3) pp. 164-171. (2016)
- [4] Popovics J., Manó S., Kiss R. M.: Személyre szabott csontpótló implantátumok előállításának folyamata irodalomfeldolgozás alapján. Biomechanika Hungarica XI. évfolyam, 1. szám
- [5] Ficzer P., Borbás L. Csontok anyagjellemzőinek közelítése a gyártástechnológiai paraméterek módosításával 3D nyomtatás esetén. Biomechanika Hungarica 10:(2) p. 22. (2017)
- [6] Reddy MVK, Ganesh BKC, Bharathi KCK, ChittiBabu P: Use of Finite Element Analysis to Predict Type of Bone Fractures and Fracture Risks in Femur due to Osteoporosis. (2016) J Osteopor Phys Act 4:180. doi: 10.4172/2329-9509.1000180
- [7] M. Mustra, K. Delac, M. Grgic: Overview of the DICOM Standard. 50th International Symposium ELMAR-2008, 10-12 September 2008, Zadar, Croatia
- [8] Györi M., Ficzer P. Use of Sections in the Engineering Practice. Periodica Polytechnica-Transportation Engineering 45:(1) pp. 21-24. (2017)

ÜVEGSZÁLLAL ERŐSÍTETT POLIMER (GFRP) MARÁSI VIZSGÁLATA

THE INVESTIGATION OF MILLING PROCESS OF GLASS FIBRE REINFORCED PLASTIC

¹Horváth Richárd, egyetemi docens, e-mail: horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu

²Stadler Róbert Gábor, demonstrátor, e-mail: stadlerrobertgabor@gmail.com

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

ABSTRACT

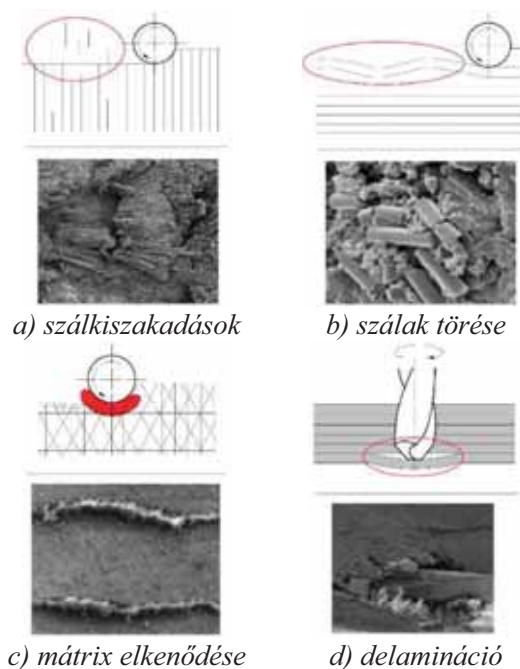
The usage of fibre-reinforced polymers is increasing nowadays. This increase is due to good properties such as high strength and low weight. The cutting of fibre-reinforced polymers raises new problems such as: fibre pull out, fibre breakage, delamination and matrix smearing. In this study the milling experiments of glass fibre reinforced polymer (GFRP) were carried out. In this investigation so-called full factorial design of experiment was performed. The cutting parameters (cutting speed, feed rate, depth of cut) on three levels were changed. During the milling tests the force components (F_x , F_y , F_z), average surface roughness (R_a) and ten-point height (R_z) were measured. Predictive models were built to estimate the R_a , R_z and calculated F_e (resultant force) and the fibre pull out and the delamination were also investigated. The effect of the cutting parameters on the parameters examined were concluded.

1. BEVEZETÉS

A szálerősítésű (pl.: üveg vagy szén) anyagok (GFRP, CFRP) felhasználása napjainkban növekszik, köszönhetően azok kedvező mechanikai tulajdonságainak. Erre a legjobb példa, a Boeing 787 Dreamliner repülőgép, melynek tömegét 50%-ban kompozitok teszik ki. Továbbá a repülőgép gyártók azt állítják, hogy a következő generációjú repülőgépekben, ahol a kompozitok aránya több, mint 50% lesz, ez csökkentheti a tüzelőanyag felhasználást, illetve a CO₂ kibocsátást is 20-25%-kal [1]. A kompozitok elterjedését az is egyértelműen mutatja, ha megvizsgáljuk az 1995-ben bevezetett Boeing 777-es típust, mely tömegének mindössze 10%-a volt kompozit [2]. Sőt a hosszútávú stratégiai célok a repülőgépipar ágazatban, hogy 2050-re 75%-kal csökkentsék a CO₂ és 90%-kal az NO_x kibocsátást kilométerenként, valamint 65%-kal csökkentsék a zajterhelést. Ezeket a célokat többek között kis

tömegű újfejlesztésű anyagokkal lehet elérni, mint amilyenek a kompozitok is. [3].

A szálerősítésű anyagok megmunkálása történhet forgácsolással. A forgácsolás során számos új probléma jelentkezik: szálkiszakadás, szálak összetörése, mátrix anyag elkenődése, valamint delamináció jelensége (lásd 1. ábra).



1. ábra Szálerősítésű anyagok forgácsolási problémái ([4] alapján)

Ezek a forgácsoláskor fellépő problémák rontják a kész darab mechanikai tulajdonságait, ezért azok minimalizálása illetve elkerülése szükséges. Számos kutatás foglalkozik a szálerősítésű anyagok forgácsolhatósági vizsgálataival.

Mathivanan és társai [5] GFRP és CFRP műanyagok forgácsolhatóságát vizsgálták zárt horony marása esetén. A 15 mm vastag munkadarabban a szálorientáció rétegenként egymásra merőleges volt. A forgácsolási kísérletben (kilenc mérési pont) Ø10mm K10 keményfém marót használtak, a forgácsolási

paramétereket három szinten változtatták. Alapvetően az eredő erőt vizsgálták és megállapították, hogy különösen az előtolás növeli jobban az eredő erőt. Bár azonos forgácsolási paraméterek mellett a GFRP kisebb forgácsolási erőt igényel, de a forgácsolási paraméterek növelésekor a CFRP forgácsoló erő igénye jobban növekszik, mint a GFRP erőigénye. Végezetül kis előtolást és magas forgácsolósebességet ajánlanak az ilyen típusú anyagok forgácsolásához.

Hasonlóan ez előző kutatáshoz 15 mm-es GFRP marási vizsgálatát L₉-es Taguchi módszerrel végezték el Ø10mm K8-as szerszámmal Ghalme és társai [6]. A forgácsolási paramétereket három szinten változtatták és mérték a felületi érdességet. Eredményeikben elemezték a forgácsolási paraméterek hatását a felületi érdességre, valamint optimális forgácsolási paramétereket állapítottak meg a felületi érdesség minimalizálására.

Jenarthanan és Naresh [7] L₂₇-es Taguchi tervvel elemezték a GFRP anyag marási technológiájánál az eredő forgácsolási erőt és a delaminációt. Vizsgálatukban három szinten változtatták a forgácsolási paramétereket, valamint a (Ø5mm) maró szerszámok spirál szögét és a szálorientációt. Méréseikből optimális forgácsolási paramétereket, spirálszögét és szálorientációt állapítottak meg az eredő erő és a felületi érdesség minimalizálása érdekében.

Dash és társai [8] TiO₂-vel töltött GFRP marását vizsgálták. Kísérleteikben a forgácsolási paramétereket három szinten változtatták és húsz mérési pont alapján elemezték a delaminációs jelenséget és négy érdességi paramétert (*Ra*, *Rt*, *Rsm*, *Rz*). Az előző vizsgálatokhoz hasonlóan olyan forgácsolási paraméter kombinációt kerestek, ahol minimalizálhatók az érdességi paraméterek és a delamináció. Az eredményeikből arra jutottak, hogy az *Ra* paraméterre a forgácsoló sebesség, az *Rsm*-re a fogásmélység, *Rz* paraméterre és a delaminációra pedig az előtolás a legszignifikánsabb.

Razfar és Zanjani [9] is optimális forgácsoló paramétereket keresett GFRP marásának vizsgálatokor, genetikus algoritmus és neurális háló módszerekkel. Vizsgálatukban a forgácsolási paramétereket három szinten változtatták valamint kétélű és négyélű (Ø4mm) marót alkalmaztak. Teljes kísérletet végeztek. Hasonlóan az előbb bemutatott kutatási eredményekhez Razfar és Zanjai [9] is arra jutottak, hogy nagyobb forgácsoló sebességgel és alacsonyabb előtolási sebességgel jobb felületi érdesség érhető el valamint alacsonyabb forgácsoló sebességgel és alacsonyabb előtolási sebességgel kisebb a delamináció.

Ebben a tanulmányban GFRP marási vizsgálatát végezzük el. A forgácsolási paramétereket három szinten változtatva teljes kísérletet elvégezve. A kísérletek során elemezzük a forgácsolási eredő erőt, a két, leggyakrabban használt érdességi paramétert (*Ra*, *Rz*), valamint a szálkiszakadást és a delaminációs jelenséget is.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. A kísérletben használt alapanyag és szerszám

A forgácsolási kísérleteket egy 26 rétegű, üvegszállal erősített kompoziton végeztük. A rétegrendet tekintve a szálak egymásra merőlegesen voltak elhelyezve (2. ábra).



2. ábra Rétegek szálelrendezése a munkadarabban

A munkadarab (3. ábra) vákuuminfúziós technológiával készült. Az üvegszál típusa E-glass, kémiai összetételét az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Az E-Glass osztályú üvegszálak kémiai összetétele [10]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	B ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃
55.0	14.0	0.2	7.0	22.0	1.0	0.5	0.3	-

A mátrix anyag Araldite LY1564 epoxigyanta és Aradur 3487 térhálósító.

A marási kísérletek egy üveg- és szénszál erősítésű kompozitokhoz specializált Ø10 mm-es gyémánt bevonatú, mikrofogazatú keményfém maróval lettek végezve (3. ábra). A gyémánt bevonat növeli a szerszám kopásállóságát, a mikrofogazat pedig csökkenti a delaminációs károsodások és szálkiszakadás keletkezését.



3. ábra Forgácsolási kísérlet elrendezése

2.2. A kísérletben használt mérőeszközök és mért paraméterek

A marási kísérletek során az F_x , F_y és F_z (3. ábra) irányú erőkomponensek mérésére piezoelektromos elven működő KISTLER 9257b erőmérő rendszert alkalmaztunk. Az erőmérő a munkadarab befogó alá lett felszerelve. Az erőmérő mérési tartománya $F_x = F_y = -5 \dots 5$ kN, valamint $F_z = -5 \dots 10$ kN [11]. Az erőadatok Kistler DynoWare szoftverrel lettek kielemezve.

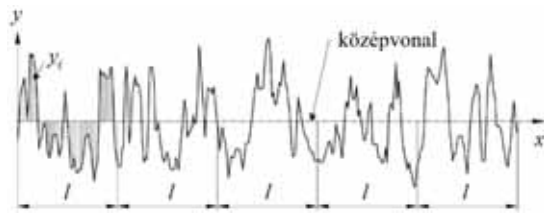
A szerszámra és a munkadarabra az erőkomponensek eredője hat, ezért a mért három erőkomponens eredőjét (F_e) vizsgáljuk:

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

A forgácsolási kísérletek után vizsgáltuk a szálkiszakadást (1.a ábra) és a delaminációt (1.d ábra) is, egy Nikon SMZ18 sztereó mikroszkóppal. A képeket az Image-Pro Insight szoftver segítségével készítettük.

A felületi érdesség mérése Mitutoyo SJ-301 érdességmérővel történt (cut-off, $\lambda_s = 2,5$ mm; alapmérési hosszok száma, $N = 5$). Az iparban gyakran használt érdességi paramétereket vizsgáltuk, úgymint az átlagos felületi érdesség (R_a) valamint az egyenetlenség magasság (R_z). (Minden érdességi paraméter háromszor lett megmérve, és azok átlagát használtuk fel.)

Az átlagos felületi érdesség paraméter (R_a) (4. ábra) a legismertebb érdességi paraméterek egyike, mely alapvetően a felület magasságirányú leírását szolgálja és értéke jó képet ad a felület finomságáról, durvaságáról.



4. ábra Átlagos felületi érdesség értelmezése [12]

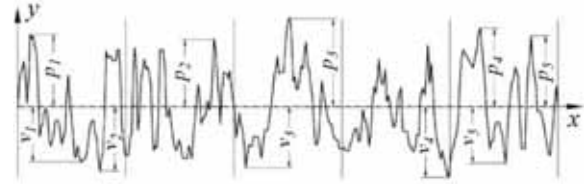
Az átlagos felületi érdesség matematikai definíciója, valamint annak digitális mérési adatokból való meghatározása az alábbi [12]:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (2)$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3)$$

ahol n – az értékelési hossz mentén vett minták száma; y – az ordináta.

A másik paraméter az R_z mely a vizsgált felület szakasz öt legnagyobb csúcs, valamint öt legmélyebb völgy értékét elemzi (5. ábra).



5. ábra Az egyenetlenség magasság értelmezése ($R_{z(ISO)}$, $R_{z(DIN)}$) [12]

Az R_z matematikai meghatározása kétféle módon történhet, mely a következő [17]:

$$R_{z(ISO)} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (4)$$

$$R_{z(DIN)} = \frac{1}{2n} \left(\sum_{i=1}^n p_i + \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (5)$$

ahol n az értékelési hossz mentén vett minták száma, p – csúcsmagasság, v – völgymélység.

2.3 Alkalmazott kísérletterv bemutatása

A marási kísérletek teljes kísérletterv alapján készültek, mely olyan kísérletsorozat, amelyben a faktorok összes lehetséges szintkombinációját realizáljuk. A kiértékeléshez a válaszfüggvények módszerét (RSM) használtuk. A forgácsolási kísérletek alatt három bemenő faktort változtattunk (forgácsoló sebesség, előtoló sebesség, és fogásmélység) három szinten. A szintek egymástól ekvidisztáns távolságra vannak. A mért paraméterek az eredő erő (F_e) és a két érdességi paraméter (R_a , R_z).

Célunk, hogy megtaláljuk a kapcsolatot a független bemenő paraméter(ek) – x_1 , x_2 , x_3 – és a függő kimenő paraméter(ek) Y között:

$$Y = \Omega(x_1, x_2, x_3) \quad (6)$$

ahol, Ω a válasz függvény, mely az alábbi általános alakban írható fel:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (7)$$

ahol, b_0 , b_i és b_{ij} a számított koeficiens; x_1 , x_2 és x_3 a bemenő paraméterek; ε a hiba.

A teljes 3^3 -on kísérlettervet a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat. A 3^3 -on kísérletterv mérési pontjai

Mérési pontok	Bemenő paraméterek szintjei		
	x_1 (v_e)	x_2 (v_f)	x_3 (a_p)
1.	-1	-1	-1
2.	-1	-1	0
3.	-1	-1	1
4.	-1	0	-1
5.	-1	0	0
6.	-1	0	1
7.	-1	1	-1
8.	-1	1	0

Mérési pontok	Bemenő paraméterek szintjei		
	$x_1 (v_c)$	$x_2 (v_f)$	$x_3 (a_p)$
9.	-1	1	1
10.	0	-1	-1
11.	0	-1	0
12.	0	-1	1
13.	0	0	-1
14.	0	0	0
15.	0	0	1
16.	0	1	-1
17.	0	1	0
18.	0	1	1
19.	1	-1	-1
20.	1	-1	0
21.	1	-1	1
22.	1	0	-1
23.	1	0	0
24.	1	0	1
25.	1	1	-1
26.	1	1	0
27.	1	1	1

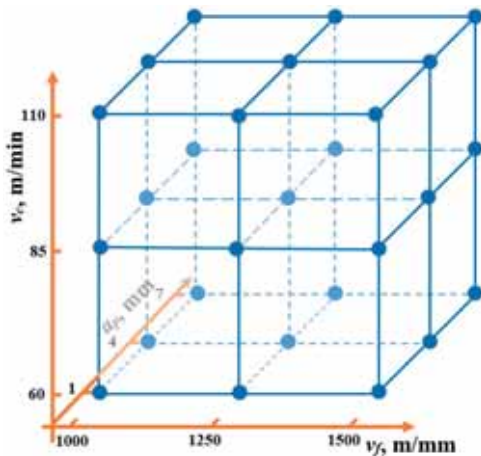
2.4 Alkalmazott kísérletterv mérési pontjai

A szakirodalom és szerszám katalógus ajánlása alapján a beállítandó forgácsolási paramétereket és azok szintjeit a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat. Forgácsolási paraméterek szintjei

Paraméterek	Szintek		
	-1	0	1
x_1 forgácsoló sebesség – v_c , m/min	60	85	110
x_2 előtoló sebesség – v_f , mm/min	1000	1250	1500
x_3 fogásmélység – a_p , mm	1	4	7

A 2. és a 3. táblázat alapján a mérési pontokat a forgácsolási paraméter tartományon a 6. ábra szemlélteti.

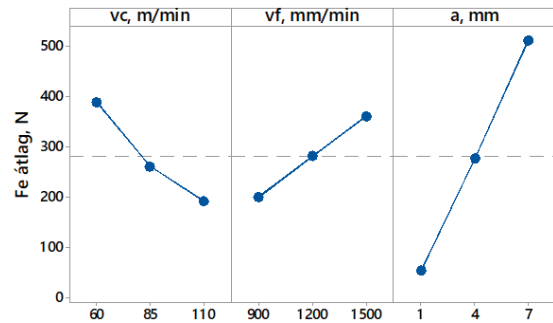


6. ábra Mérési pontok elhelyezkedése a forgácsolási paramétertartományban

3. EREDMÉNYEK

3.1 Forgácsolási paraméterek hatása az eredő erőre (Fe)

A 7. ábra a forgácsolási paraméterek hatását mutatja az eredő erőre.



7. ábra Eredő erő (Fe) főhatás ábrája

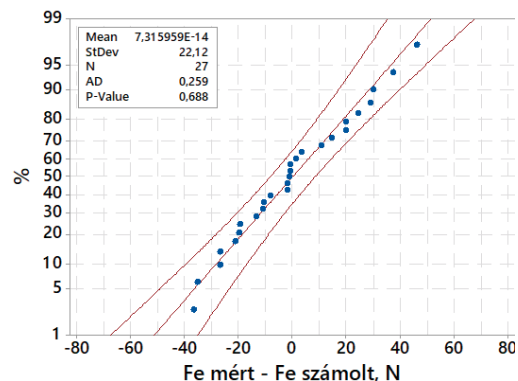
A főhatás ábrából látható, hogy míg a forgácsoló sebesség növelése csökkenti, addig az előtolás és a fogásmélység növelésével nő az eredő erő értéke.

3.2 Prediktív modell az eredő forgácsolási erő becslésére

Szignifikancia vizsgálatot végeztünk, mely megmutatta, hogy a v_f^2 és az a^2 nincs hatással az eredő erőre, így a redukált modell a (7) alapján a következő:

$$F_e = 133 - 233 \cdot 10^{-2} \cdot v_c + 3032 \cdot 10^{-4} \cdot v_f + 826 \cdot 10^{-1} \cdot a_p + 464 \cdot 10^{-4} \cdot v_c^2 - 4037 \cdot 10^{-6} \cdot v_c \cdot v_f - 11662 \cdot 10^{-4} \cdot v_c \cdot a_p + 7733 \cdot 10^{-5} \cdot v_f \cdot a_p \quad (8)$$

A prediktív modell jóságát reziduum vizsgálatokkal lehet elvégezni. Ha a reziduumok (mért és számított értékek közötti különbség) eloszlása normális, a várható értékük nulla körüli, valamint minél kisebb a szórásuk, a prediktív modell technológiai előtervezésben megfelelőnek tekinthető. A 8. ábra az eredő erő reziduumait ábrázolja normaitás hálón, melyről leolvasható, hogy az eredő erő becslésekor a hibák várható értéke gyakorlatilag zérus, a hibák eloszlása jól közelíti a normálist, azok szórása 22,12 N.

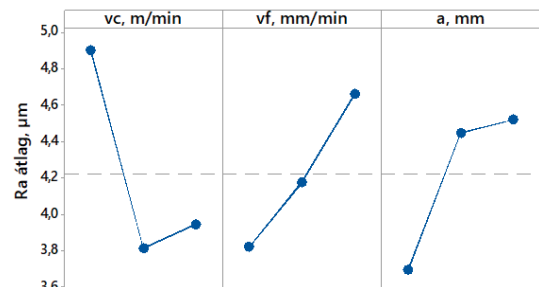


8. ábra Eredő erő reziduumainak ábrázolása normalitás hálón

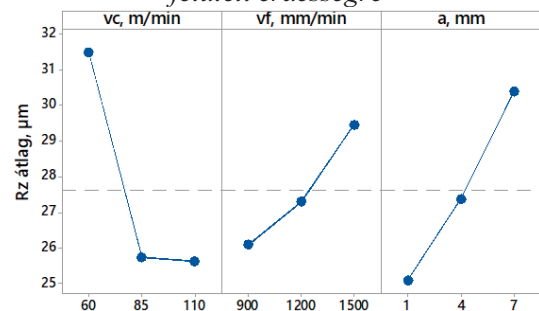
3.3 Forgácsolási paraméterek hatása a felületi érdesség paraméterekre

A 9. ábra a forgácsolási paraméterek hatását mutatja a vizsgálat felületi érdesség

paraméterekre. Az ábrákon látható, hogy a forgácsolási sebesség növelésével csökkennek a vizsgált érdességi értékek, majd a 85 m/min és a 110 m/min-es tartományban minimális emelkedés (R_a), illetve kisebb intenzitású csökkenés (R_z) tapasztalható. Az előtolósebességnél és a fogásmélységnél jól megfigyelhető, hogy a paraméterek növelésével romlanak az érdességi jellemzők.



a) Forgácsolási paraméterek hatása az átlagos felületi érdességre



b) Forgácsolási paraméterek hatása az egyenetlenség magasság érdességi paraméterre

9. ábra Felületi érdesség paraméterek főhatás ábrája

3.4 Prediktív modell az átlagos felületi érdesség (R_a) valamint az egyenetlenség magasság (R_z) becslésére

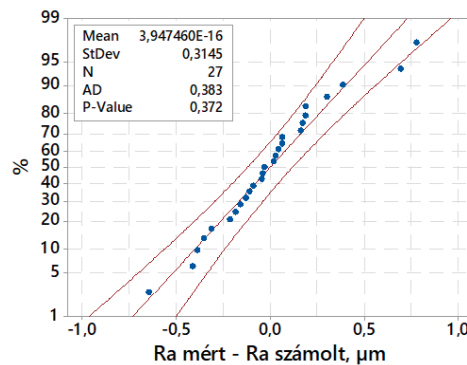
A gyártott alkatrészek egyik fontos kritériuma azok felületi érdessége. Ezért célszerű ismerni a beállítható forgácsolási paraméterek hatásán túl a várható felületi érdességi paraméterek értékét is. Ezért olyan empirikus modelleket készítettünk, melyekkel jól becsülhető a vizsgált anyag érdessége a beállított forgácsolási paraméterek függvényében. A szignifikancia vizsgálatból kiderült, hogy az átlagos felületi érdességre a v_f^2 nincs hatással, így a modell az alábbi:

$$\begin{aligned}
 R_a = & 9,72 - 1614 \cdot 10^{-4} \cdot v_c + 291 \cdot 10^{-5} \cdot v_f \\
 & - 431 \cdot 10^{-3} \cdot a_p + 974 \cdot 10^{-6} \cdot v_c^2 - 379 \cdot 10^{-4} \cdot a_p^2 \\
 & - 36 \cdot 10^{-6} \cdot v_c \cdot v_f + 487 \cdot 10^{-5} \cdot v_c \cdot a_p + 382 \cdot 10^{-6} \cdot v_f \cdot a_p
 \end{aligned} \quad (9)$$

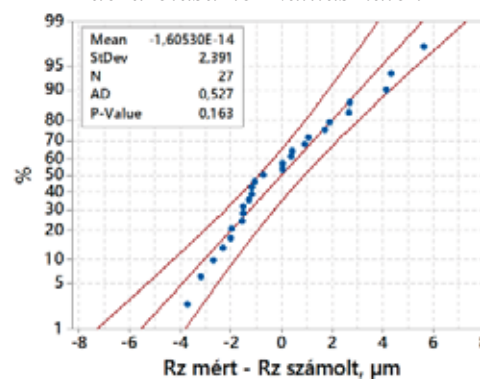
Az egyenetlenség magasság értékeire pedig a v_f^2 , a_p^2 , $v_c v_f$ valamint $v_c a_p$ tagok nincsenek hatással, így a prediktív modell:

$$\begin{aligned}
 R_z = & 703 \cdot 10^{-1} - 88 \cdot 10^{-2} \cdot v_c - 477 \cdot 10^{-5} \cdot v_f \\
 & - 233 \cdot 10^{-2} \cdot a_p + 449 \cdot 10^{-5} \cdot v_c^2 + 259 \cdot 10^{-5} \cdot v_f \cdot a_p
 \end{aligned} \quad (10)$$

Az egyenletek jóságát szintén reziduum vizsgálatokkal ellenőriztük. A 10. a) és b) ábrákon jól látható, hogy a hibák eloszlása közelíti a normálist, valamint a hibák várható értéke gyakorlatilag nulla a szórásuk pedig igen kicsi, R_a esetén 0,31 μm, R_z esetén pedig 2,4 μm.



a) Átlagos felületi érdesség reziduumainak ábrázolása normalitás hálón



b) Egyenetlenség magasság reziduumainak ábrázolása normalitás hálón

10. ábra Prediktív egyenletek (felületi érdesség) hibáinak vizsgálata

3.5 Szálkiszakadás vizsgálata

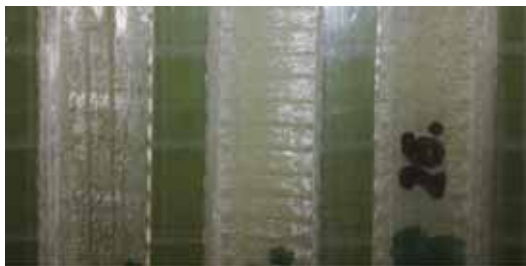
A szálkiszakadás mindig a kilépő oldalon az előtoló sebesség vektorral megegyező száliránnyal rendelkező rétegek esetében figyelhető meg az ellenirányú marás oldalán (11. ábra). A szálkiszakadások forgácsolási paraméterektől függetlenek (a vizsgált forgácsolási tartományban) a méretük minden esetben $d/2$ körüli.



11. ábra Szálkiszakadások a marás kilépő felületén ($a_p = 7$ mm)

3.6 Delamináció vizsgálat

Delamináció ebben az esetben a marás következtében szétváló felső rétegeket jelenti. Megvizsgálva az összes forgácsolási kombinációval történt mart felületeket releváns delamináció nem volt észlelhető (12. ábra).



12. ábra Mart felületek felülnézeti képe

4. ÖSSZEGZÉS

Ebben a publikációban GFRP marásának vizsgálatát végeztük el teljes kísérletterv segítségével. A forgácsolási paramétereket három szinten változtattuk, mértük az eredő forgácsolási erőt, valamint a mart felületek R_a , R_z érdességi paramétereit. Főhatás ábrákkal elemeztük, a forgácsolási paraméterek hatását a vizsgált jellemzőkre, prediktív modelleket készítettünk melyek a technológiai előtervezést segíthetik, valamint elemeztük a szálkiszakadás és a delamináció jelenségét. Vizsgálatainkból az alábbi következtetések vonhatók le:

- az eredő forgácsoló erőt a forgácsoló sebesség növelése csökkenti, az előtoló sebesség és a fogásmélység növelése növeli.
- az R_a , R_z paramétereket a sebesség növelése csökkenti, és hasonlóan az eredő erőhöz, az előtoló sebesség és a fogásmélység növelése rontja az érdességi paramétereket.
- az épített prediktív modellek pontossága a technológiai előtervezésben megfelelőnek mondhatók, azok hibái normális eloszlást mutatnak és várható értékük nulla körüli.
- szálkiszakadások a kilépési oldalon találhatóak az ellenirányú marási oldalon, melyek nem függenek a forgácsolási paramétereiktől. A szálkiszakadások nagysága minden mérési pontban körülbelül egyforma ($d/2 \sim$ szerszám átmérő fele).
- delamináció a vizsgálatok során nem fedezhető fel, tehát megfelelő szerszámmal megfelelő forgácsolási paraméterekkel a delamináció elkerülhető illetve minimalizálható.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket szeretnék kifejezni a KANDSI Kft.-nek (AKOBEZ), hogy biztosította az egyedileg gyártott munkadarabokat, illetve a

GranTOOL Kft.-nek, hogy biztosította a vizsgálatok elvégzéséhez szükséges szerszámot.

6. IRODALOM

- [1] Timmis, A. J., Hodzic, A., Koh, L., Bonner, M., Soutis, C., Schäfer, A. W., & Dray, L. (2015). Environmental impact assessment of aviation emission reduction through the implementation of composite materials. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(2), 233-243.
- [2] Hashish, M., & Kent, W. A. (2013, September). Trimming of CFRP aircraft components. In *Proceeding of the 2013 WJTA-IMCA Conference and Expo, Houston, USA* (pp. 9-11).
- [3] M'Saoubi, R., Axinte, D., Soo, S. L., Nobel, C., Attia, H., Kappmeyer, G., ... & Sim, W. M. (2015). High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. *CIRP Annals*, 64(2), 557-580.
- [4] Miller, J., Eneyew, E. D., & Ramulu, M. (2013). Machining and drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites. *SAMPE Journal*, 49(2), 36-46.
- [5] Mathivanan, N. R., Mahesh, B. S., & Shetty, H. A. (2016). An experimental investigation on the process parameters influencing machining forces during milling of carbon and glass fiber laminates. *Measurement*, 91, 39-45.
- [6] Ghalme, S., Mankar, A., & Bhalerao, Y. J. (2016). Parameter optimization in milling of glass fiber reinforced plastic (GFRP) using DOE-Taguchi method. *SpringerPlus*, 5(1), 1376.
- [7] Jenarathanan, M. P., & Naresh, N. (2015). Process parameters optimization on machining force and delamination factor in milling of GFRP composites using grey relational analysis. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 22, 313-320.
- [8] Dash, S., Routara, B. C., & Nayak, R. K. (2017). Optimization of process parameters in milling of TiO₂ filled GFRP composite. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3023-3032.
- [9] Razfar, M. R., & Zadeh, M. Z. (2009). Optimum damage and surface roughness prediction in end milling glass fibre-reinforced plastics, using neural network and genetic algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223(6), 653-664.
- [10] Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., & Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites—a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), 1258-1275.
- [11] KISTLER Multicomponent Dynamometer 9257b datasheet, 2009, Kistler Group
- [12] Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa, I. M., & Soliman, H. H. (2002). Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 123(1), 133-145.

A MÁGNESES TÉR HATÁSA VISZKÓZUS FERROFLUID ÁRAMLÁSÁBAN

THE EFFECT OF THE MAGNETIC POTENTIAL IN THE FLOW OF VISCOSE FERROFLUID

Hriczó Krisztián, PhD *

ABSTRACT

The flow of viscose fluids is very important in engineering practice due to several applications. The aim of this paper is to provide numerical results on the magneto-thermomechanical interaction between heated viscous incompressible ferrofluid and a cold wall in the presence of a spatially varying field. Numerical results are represented for the distributions of velocity and temperature.

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedek egyik népszerű kutatási területe az ipari alkalmazások miatt a viszkózus folyadékok áramlása. Napjainkban kiemelet érdeklődésre tartanak számot a nanofolyadékok, amelyek egy alapfolyadék és valamely fémes vagy nem fémes nanorészecskék homogén keveréke. Azokat a nanofolyadékokat, amelyben a nanorészecskék mágnesezhetőek ferrofluidnak nevezik.

A ferrofluidokat az a tulajdonságuk teszi különlegessé, hogy egyszerre képesek folyadékként és mágneses anyagként is viselkedni, amelyet az ipar számos területén hasznosítanak, úgy, mint járművek vagy elektronikai eszközök hűtése, atomreaktorok üzemeltetés, hőcserélők alkalmazása. A mágnesezhető nanofolyadékok nagyon hasznosak a rákos megbetegedések kezelésénél, sebkezelésnél vagy az MRI felvételek készítésénél, stb [8].

Amikor egy H külső mágneses tér hatása alá helyezzük a mágnesezhető szuszpenziókat, akkor az anyagban levő dipólusok és vonaláramok indukálnak egy M mágneszettséget. Az ilyen közegben kialakuló magneto-hidrodinamikai (MHD) áramlási feladatokat számos esetben vizsgálták végtelennek tekintett síkfelület mentén (lásd [1], [2], [4-6], [9-12], [17]).

Az MHD folyadékok hidrodinamikai áramlásában az áramlásra merőleges irányú mágneses mezőt egyenletesnek tekintjük.

Vizsgálataiban Neuringer [16] nem egyenletes mágneses mező mellett végezte, ahol két különböző esetben vizsgálta az alkalmazott mágneses mező

ferrofluidok dinamikájára gyakorolt hatását és numerikus megoldásokat keresett. Első esetben egy fűtött ferrofluid hideg felület mentén történő kétdimenziós áramlásának stagnáló pontját vizsgálta, második esetben kétdimenziós párhuzamos áramlást feltételezett egy síkfelület mentén, ahol a felület hőmérsékletéről feltételezte, hogy az lineárisan csökken.

A jelen dolgozat célja, hogy az említett modellt alapul véve a ferrofluidok időben állandósult viselkedését vizsgáljuk mágneses térben a hasonlósági analízis alkalmazásával. A módszer alkalmazásának legfontosabb előnye, hogy a folyamatot leíró nemlineáris parciális differenciálegyenleteket visszavezetjük nemlineáris közönséges nemlineáris differenciálegyenletekre. Meghatározzuk az egyenletek numerikus megoldását, melyekből megkaphatjuk a nyírési feszültséget és a hőátadást a síkfelület mentén, továbbá a sebesség és hőmérséklet eloszlást a határterületben, amelyeket majd összehasonlítunk az irodalomból ismert korábbi eredményekkel [16]. Grafikusan szemléltetjük a modell paramétereinek a megoldásokra gyakorolt hatását, illetve rámutatunk arra, hogy több esetben létezik duális megoldás a matematikai modellhez.

2. AZ ÁRAMLÁS MEGHATÁROZÓ EGYENLETEI

Egy összenyomhatatlan, viszkózus és elektromosan nem vezető, ferromágneses folyadék kétdimenziós állandósult áramlását tekintjük vízszintes síkfelület mentén az 1. ábrán látható elhelyezéssel.

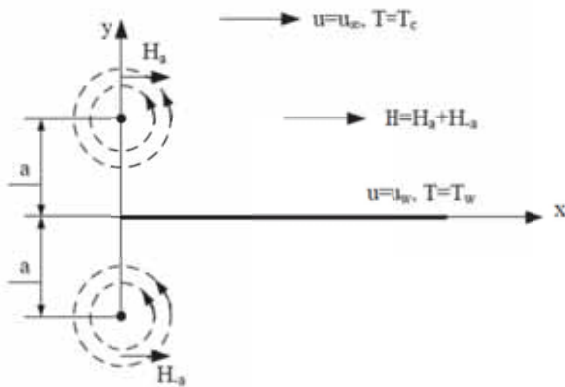
A feltételezésünk szerint az alkalmazott mágneses dipólusok egyenlő távolságra helyezkednek el a vezető élétől. A két elektromos vezető szál az áramlási irányra merőlegesen helyezkedik el, és az általuk keltett mágneses mező az áramlás síkjából kifelé irányított.

A ferro-hidrodinamikai kölcsönhatásokban nélkülözhetetlen a térben változó mezők létezése [13], az alábbiakban a következő feltevéseket tesszük:

- (i) a folyadékelem mágnesezésének iránya mindig a helyi mágneses tér irányába mutat,
- (ii) a folyadék elektromosan nem vezető és

* egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Matematikai Intézet

(iii) az elmozdulási áram elhanyagolható.



1. ábra Mágneses mezőbe helyezett síklappal párhuzamos áramlás

Az alkalmazott mágneses teret a $\mathbf{H} = -\nabla\phi$ egyenlettel, azaz a mágneses skalár potenciál negatív gradienseként vezetjük be, ahol a ϕ függvény az alábbi formulával fejezhető ki:

$$\phi(x, y) = -\frac{I_0}{2\pi} \left(\tan^{-1} \frac{y+a}{x} + \tan^{-1} \frac{y-a}{x} \right),$$

ahol I_0 az egy hosszegységre jutó dipólus momentum és a az elektromos vezető szálak vezető éltől mért távolsága.

A határretegben, közel a falhoz, azonban jelentősen távol a vezetőszáltól (tehát ha $x \gg a$) a számításokat követően az alábbi formába írható a mágneses mező x szerinti deriváltja

$$[\nabla H]_x = -\frac{I_0}{\pi} \frac{1}{x^2},$$

amelyet modellünkben alkalmazunk.

Egy kétdimenziós, összenyomhatatlan áramlás határreteg egyenletei a folytonossági, mozgási és energia egyenleteken alapulnak.

Vizsgálataink az alábbi négy alapfeltevés esetén érvényesek:

(i) az alkalmazott mező elég erős ahhoz, hogy a határretegben mindenütt telítette tegye a ferrofluidot,

(ii) a folyadékra ható szélsőséges hőmérsékleteken belül a hőmérséklettől függő \mathbf{M} mágneszettség változását az $M = K(T_c - T)$ lineáris egyenlettel közelíthetjük, ahol K a piromágneses együttható és T_c a Curie-hőmérséklet [3], [16]

(iii) az indukált mágnesezésből adódó indukált mezőt elhanyagoljuk, így a hidrodinamikai és elektromágneses egyenletek szétválaszthatók,

(iv) a modellben az alkalmazott hőmérsékleti tartományban a c termikus hőkapacitás, a k hővezető képesség és a ν viszkozitási együttható független a hőmérséklettől.

A vizsgált áramlás az alábbi egyenletekkel írható le:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{I_0 \mu_0 k}{\pi \rho} (T_c - T) \frac{1}{x^2} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3)$$

$$c \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4)$$

ahol az x és y a síkkal párhuzamos és arra merőleges koordinátatengelyek, u és v az x és y irányú sebesség komponensek, μ_0 a kinematikus viszkozitás, továbbá ρ jelöli a környező folyadék sűrűségét, amit állandónak tekintünk.

A (2)-(4) egyenletrendszerhez a felvett modell szerint az alábbi peremfeltételek járulnak:

- a síklap mentén ($y = 0$):

$$u(x, 0) = 0, v(x, 0) = 0, T(x, 0) = T_w \quad (5)$$

ahol $T_w = T_c - Ax^{m+1}$ (A és m konstans), és

- távol a síklaptól ($y \rightarrow \infty$):

$$u(x, y) \rightarrow u_\infty, T(x, y) \rightarrow T_\infty \quad (6)$$

ha y távol van a határretegtől ($y \rightarrow \infty$), itt a $T_\infty = T_c$ és $u_\infty = U_\infty x^m$, $U_\infty = \text{konstans}$ a külső áramlási sebesség, melyet állandónak feltételezünk vizsgálatunk során.

Az m paraméter a hatványkitevőben szerepel. Az $m = 0$ paraméter érték utal a lineáris hőmérséklet profilra és a konstans áramlási sebességre. Abban az esetben, ha $m = 1$ a hőmérséklet négyzetes és a sebesség lineáris változása. Az $m = -1$ érték kifejezi, hogy nincs hőmérsékletváltozás a felületen.

Bevezetjük a ψ áramfüggvényt az $u = \partial\psi / \partial y$ és $v = -\partial\psi / \partial x$ formulával, amellyel a (2) folytonossági egyenlet automatikusan teljesül. A (3)-(4) egyenletekbe behelyettesítve az áramfüggvényt az alábbiak adódnak:

$$\frac{\partial\psi}{\partial y} \frac{\partial^2\psi}{\partial yx} - \frac{\partial\psi}{\partial x} \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} = \nu \frac{\partial^3\psi}{\partial y^3} - \frac{I_0 \mu_0 K}{\pi \rho} (T_c - T), \quad (7)$$

$$c \left[\frac{\partial\psi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial\psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} \right] = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \quad (8)$$

A peremfeltételek a következő formában adhatóak meg az áramfüggvényre vonatkozóan:

$$\psi'_y(x, 0) = 0, \psi'_x(x, 0) = 0, T(x, 0) = T_c - Ax^{m+1}, \quad (9)$$

$$\psi'_y(x, y) \rightarrow U_\infty x^m, T(x, y) = T_c \text{ as } y \rightarrow \infty. \quad (10)$$

Így két egyváltozós függvényre két parciális differenciálegyenletet kaptunk. A (7)-(10) peremérték feladat lehetővé teszi, hogy a ψ és T megoldásainak egy speciális változatát, az ún. hasonlósági megoldásait határozzuk meg az alábbi formában [7]:

$$\left. \begin{aligned} \psi(x, y) &= C_1 x^b f(\eta), \\ T &= T_c + Ax^{m+1} \theta(\eta), \\ \eta &= C_2 x^d y \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ahol b és d kielégíti a $b + d = m$ skálázási feltételt, továbbá a C_1 és C_2 együtthatókra igaz a $C_1 / C_2 = \nu$ összefüggést. Valós számok esetén $b - d = 1$ és $C_1 C_2 = U_\infty$, így

$$b = \frac{m+1}{2}, \quad d = \frac{m-1}{2}$$

$$C_1 = \sqrt{\nu U_\infty}, \quad C_2 = \sqrt{\frac{U_\infty}{\nu}}$$

Alkalmazva a (11) hasonlósági transzformációt a (7)-(10) peremérték feladatra az eredeti parciális differenciálegyenlet-rendszerünket visszavezetjük a következő, csatolt, nemlineáris közönséges differenciálegyenlet-rendszer peremérték feladatára:

$$f''' - mf'^2 + \frac{m+1}{2} f f' - \beta \theta = 0 \quad (12)$$

$$\theta'' + (m+1)Pr \left(\frac{1}{2} f \theta' - \theta f' \right) = 0 \quad (13)$$

$$f(0) = 0, f'(0) = 0, \theta(0) = 1 \quad (14)$$

$$f'(\eta) = 1, \theta(\eta) = 0 \text{ as } \eta \rightarrow \infty \quad (15)$$

ahol $Pr = cv / k$ a Prandtl szám és $\beta = I_0 \mu_0 KA / \pi \rho U_\infty^2$.

A megoldásokból kifejezhetőek a $\vec{v} = (u, v, 0)$ dimenziómentes sebességkomponensei:

$$u = U_\infty x^m f'(\eta),$$

$$v = -\sqrt{\nu U_\infty} x^{\frac{m-1}{2}} \left(\frac{m+1}{2} f(\eta) + \frac{m-1}{2} f'(\eta) \eta \right).$$

Továbbá az $f''(0)$ ellenállás-tényezővel és $\theta'(0)$ hőátadási együtthatóval kifejezhető a felület menti nyírási feszültség és hőátvitel.

Ismereteink szerint az $m = 0$ esethez tartozó kapcsolt határréteg egyenleteket elsőként Neuringer vizsgálta [16].

Megjegyezzük, hogy ha $m = 0$ és $\beta = 0$, akkor a (12) egyenlet megegyezik a jól ismert Blasius egyenlettel

$$f''' + \frac{1}{2} f f' = 0, \quad (16)$$

amely a newtoni folyadékok lamináris határréteg feladatainak vizsgálatánál fordul elő [2], [10].

A mágneses térbe helyezett mágnesezhető nanofolyadék hőátadási dinamikáját numerikusan vizsgáljuk matematikai megközelítésben, ahol a folyadék elektromosan nem vezető és a megoldások kereséséhez feltételeztük az $x \gg a$ geometriai feltétel érvényességét.

3. NUMERIKUS MEGOLDÁSOK

Számos numerikus módszer ismert olyan erősen nemlineáris peremérték feladatok megoldására, mint a (12)-(15) feladat.

Egyik ilyen eljárás az ún. HDM (higher derivative method, azaz „magasabb rendű deriváltak módszere”), melynek elve az A-stabil Implicit Runge-Kutta módszerek stabilitási függvényéből származik [14]. A metódust Chen és szerzőtársai implementálták Maple-ben, majd ezt nyílt forráskódúként közzétették [11]. A (12)-(15) peremérték feladat numerikus megoldásainak meghatározására ennek módosítását alkalmazzuk.

A (12)-(13) csatolt, harmadrendű közönséges differenciálegyenlet-rendszert átírva elsőrendű differenciálegyenlet-rendszerre meg tudjuk adni, majd beállítva a peremfeltételeket és paramétereket futtatjuk a programot és elemezzük a kapott numerikus megoldásokat.

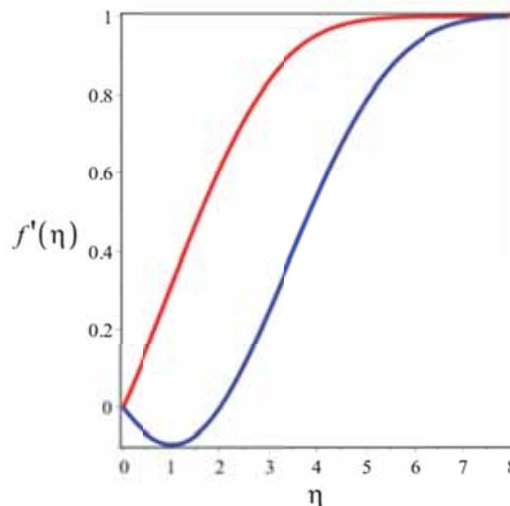
4. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

Mágneses térbe helyezett ferrofluid áramlását vizsgáltuk síklap mentén.

Az MHD áramlás kapcsolt, nemlineáris parciális differenciálegyenlet-rendszerét visszavezettük csatolt, nemlineáris közönséges differenciálegyenlet-rendszerre a hasonlósági analízis alkalmazásával.

Ezt követően Maple-ben meghatároztuk a peremérték feladat numerikus megoldásait a HDM módszer alkalmazásával.

Numerikus számításaink során duális megoldást kaptunk, ahol a dimenziómentes sebességprofilra, rögzített paraméterek esetén ún. alsó és felső megoldást szemléltet a 2. ábra. Fontos megjegyeznünk, hogy a felső megoldás nagyon jó egyezést mutat Neuringer [16] által közölt megoldással.

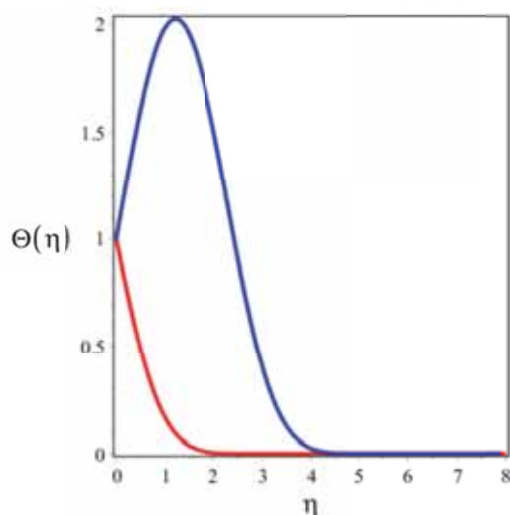


2. ábra Duális megoldás a sebességprofilra ($m = 0, \beta = 0.1, Pr = 10$)

A 3. ábrán mutatjuk be ugyanezen paraméterekhez tartozó hőmérséklet eloszlásokat, ahol szintén két

megoldást kaptunk, azonban ebben az esetben az alsó megoldás tartozik a felső sebességprofilhoz és ez itt is jó egyezést ad Neuringer eredményeivel.

Tehát az alkalmazott numerikus szimulációval duális megoldásokat tudunk meghatározni a határretegben mind a sebesség, mind a hőmérséklet eloszlásra, ahol az egyik új megoldásnak számít, a másik pedig jó egyezőséget mutat az irodalomból ismert korábbi eredményekkel.



3. ábra Duális megoldás a hőmérsékletprofilra ($m = 0, \beta = 0.1, Pr = 10$)

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„A 129257 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a K_18 pályázati program finanszírozásában valósult meg.”

6. IRODALOM

- [1] M. S. ABEL, N. MAHESHA, Heat transfer in MHD viscoelastic fluid flow over stretching sheet with variable thermal conductivity, non-uniform heat source and radiation, *Applied Mathematical Modelling* 32(2008), 1965–1983.
- [2] Ö. B. ADIGÜZEL, K. ATALIK, Magnetic field effects on Newtonian and non-Newtonian ferrofluid flow past a circular cylinder, *Appl. Math. Modelling* 42(2017), 161–174.
- [3] Y. AMIRAT, K. HAMDACHE, Heat Transfer in Incompressible Magnetic Fluid, *J. Math. Fluid Mech.* 14 (2012), 217–247.
- [4] H. I. ANDERSSON, O. A. VALNES, Flow of a heated Ferrofluid over a stretching sheet in the presence of a magnetic dipole, *Acta Mechanica* 128 (1988), 39–47.
- [5] H. I. ANDERSSON, MHD flow of a viscoelastic fluid past a stretching surface, *Acta Mechanica* 95 (1992), 227–230.
- [6] H. A. ATTIA, N. A. KOTB, MHD flow between two parallel plates with heat transfer, *Acta Mechanica* 117 (1996), 215–220.
- [7] G. I. BARENBLATT, Scaling, Self-similarity, and Intermediate Asymptotic, Cambridge Text in *Applied Mathematics*, Vol. 14, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- [8] M. M. BHATTI, T. ABBAS, M. M. RASHIDI, Numerical Study of Entropy Generation with Nonlinear Thermal Radiation on Magnetohydrodynamics non-Newtonian Nanofluid Through a Porous Shrinking Sheet, *J. Magnetics* 21 (2016), 468–475.
- [9] G. BOGNÁR, On similarity solutions of MHD flow over a nonlinear stretching surface in non-Newtonian power-law fluid, *Electron. J. Qual. Theory Differ. Equ.* 2016, 1–12.
- [10] G. BOGNÁR, Magnetohydrodynamic Flow of a Power-Law Fluid over a Stretching Sheet with a Power-Law Velocity, in: *Differential and Difference Equations with Applications* (Springer Proceedings in Mathematics and Statistics; 164. ICDDEA, Amadora, Portugal, 2015), Springer, Bazel, 2016, 131–139.
- [11] G. BOGNÁR, Numerical and analytic investigation of some nonlinear problems in fluid mechanics, *Computers and Simulation in Modern Science. Vol. II.: Selected papers from WSEAS Conferences.* Athens:WSEAS Press, 2008. 172–180.
- [12] G. BOGNÁR, Analytic Solutions to a Boundary Layer Problem for Non-Newtonian Fluid Flow Driven by Power Law Velocity Profile WSEAS Trans. on Fluid Mech. 6 (2011)22-31.
- [13] J. CHEN, D. SONAWANE, K. MITRA. V. R. SUBRAMANIAN, Yet another code for Boundary Value Problems- Higher Derivative Method, manuscript
- [14] W. E. MILNE, Numerical Solution of Differential Equations, Jhon Wiley & Sons, 1953.
- [15] J. L. NEURINGER, R. E. ROSENSWEIG, Ferrohydrodynamics *Phys. Fluids* 7 (1964), 1927–1937.
- [16] J. L. NEURINGER, Some viscous flows of a saturated ferrofluid under the combined influence of thermal and magnetic field gradients *J. Non-linear Mech.* 1 (1966), 123–127.
- [17] P. G. SIDDHESHWAR, U. S. MAHABALESHWAR, Effect of radiation and heat source on MHD flow of a viscoelastic liquid and heat transfer over a stretching sheet *Int. J. Non-Linear Mech.* 40 (2005), 807–820.

NAGY TERHELÉSŰ ÉS FESZTÁVOLSÁGÚ AGRÁR- IPARI KOMPLEXUMOK CÖLÖPALAPOZÁS TERVEZÉSÉHEZ HASZNÁLT MÓDSZEREK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

COMPARISON OF METHODS USED FOR THE PILE FOUNDATION PLANNING OF HIGH-BASED AND FERROUS AGRICULTURAL INDUSTRY COMPLEXES

Kaczvinszki-Szabó Vera*, Telekes Gábor**

TARTALMI KIVONAT

Az agrárium és az ipar fejlődése egyre inkább szükségessé teszi a nagy terhelésű és fesztávolságú létesítmények (állattartó telepek, terménytároló csarnokok és silók, stb.) építését. A nagy fesztávolság miatt, általában a szokásosnál nagyobb terhelések adódnak át az alapra, ezért gyakran alkalmaznak cölöpalapozást. A cölöpalapozás esetén a cölöpök hatékony teherbírását a legpontosabban próbaterhelési diagram alapján lehet meghatározni, de ez rendkívül költséges eljárás, ezért a legújabb cölöptervezési módszerek a gazdaságosabb statikus szondázási adatokat használják fel. Kétféle, statikus szondázási adatot kiértékelő módszerrel számoltuk 5 különböző talajviszony között épített fúrt cölöp teherbírását. Ehhez az FTV által korábban egy helyen készített statikus szondázási és próbaterhelési eredményeket használtuk fel. A különböző számítási módszerek eredményeit hasonlítottuk össze.

ABSTRACT

The development of agriculture and industry increasingly requires the construction of large-scale and span-length facilities (livestock farms, grain storage halls and silos etc.). Because of the large span distance, usually larger loads than usual are transferred to the base, so pile foundations is often applied. In the case of pile foundations, the effective load bearing capacity of the piles can be determined most accurately by a static pile load test, but it is a costly procedure, therefore the latest pile design methods use more economical cone penetration test data. We have evaluated the behavior of drilled pile constructed between 5 different soil conditions using two methods like cone penetration test data. For this we used the results of the cone penetration test and pile load test performed by FTV earlier in one place. We compared the results of different methods.

*tanársegéd, Szent István Egyetem, Ybl Miklós Építéstudományi Kar

** főiskolai tanár, Szent István Egyetem, Ybl Miklós Építéstudományi Kar

1. BEVEZETÉS

Régebben voltak a számítási képletekkel történő teherbírás meghatározások és a statikus próbaterhelés szerinti formula. Az elmúlt 40-50 évben számos cölöp próbaterhelés készült, mert a korábbi szabvány úgy rendelkezett, hogy a cölöpök 1 %-át, de minimum 2 db cölöpöt kellett próbaterhelni, így nagyszámú próbaterhelési eredmény készült, melyeket gyűjtemény formájában adtak ki. A szabvány változásával azonban sajnálatos módon a kell, helyett lehet szót használtak, tehát a próbaterhelések kötelező készítésének ideje megszűnt. Ezzel egy időben viszont a szondázási technológiák komoly fejlődésen mentek keresztül, (nyomó, verő, vagy más néven statikus, dinamikus szonda) mely felszínre hozott jó pár szondázási eredmények alapján meghatározott cölöpteherbírás számítási eljárást. Nyugaton már elfogadottakká, alkalmazhatóvá váltak, míg hazánkban a legutóbbi szabvánnyal kerültek terítékre és identifikálásra. Ezt a folyamatot tovább segítette, hogy gazdaságossági szempontok alapján lényegesen versenyképesebbek a szondázások, mint a próbaterhelések.

Jelen tanulmányban néhány példán keresztül szeretnénk összehasonlítani a fúrt cölöpök különböző teherbírás számításait. Két számítási módszerben statikus szondázási eredményeket használtunk és egyben a statikus próbaterhelések adatait elemeztük. A megemlített két számítási módszer a nyomószonda talpellenállási adataiból számol, az egyik az MSZ EN 1997 szabvány szerinti módszer, a másik az LCPC módszer. A statikus próbaterhelések, nem voltak tönkremenetelig elvégezve, ezért a grafikus extrapoláció módszerével kellett kiegészíteni.

5 db fúrt cölöp adatait elemeztük. 1-1 cölöphöz sikerült a statikus szondázási mérési adatokat feldolgozni és a statikus próbaterhelési eredményeket is ábrázolni. 4 db cölöp vegyes (szemcsés és kötött) talajviszonyokba készült, 1 db, pedig teljes egészében kötött talajrétegekbe került.

2. STATIKUS SZONDÁZÁSSAL MÉRT SZONDA CSÚCSELLENÁLLÁSI ADATOKAT FELHASZNÁLÓ MÓDSZEREKRŐL

A statikus szondázáson (röviden: CPT) alapuló méretezésnek sok indoka van:

- ezek a közvetett mérési eredmények, a térbeli változásokat feltérképezik, mely talajfeltárás megmutatja a cölöpteherbírás szempontjából meghatározó vékonyabb és/vagy gyenge zónákat. A mérési eredmények kontrollálása mellett
- a CPT szondázás gazdaságosabb a hagyományos talajfeltáráshoz képest
- cölöpteherbírás számításra a szondázási eredmények sokkal olcsóbban előállíthatók, mint a statikus próbaterhelés, aminek elvégzésére igen ritkán kerül sor

A talajvizsgálati eredményeken alapuló számítások alaképlete: [5]

$$R_{b,cal} = A_b \cdot q_{b,cal} \quad (1)$$

$R_{b,cal}$ - talpellenállás számított értéke

A_b - cölöptalp keresztmetszeti felülete

$q_{b,cal}$ - fajlagos talpellenállás

$$R_{s,cal} = k \cdot \sum (h_i \cdot q_{s,cal,i}) \quad (2)$$

$R_{s,cal}$ - köpenymenti ellenállás számított értéke

k - köpeny kerülete

h_i - köpeny egyes rétegekre eső hossza

$q_{s,cal,i}$ - fajlagos köpenymenti ellenállás rétegenként

A $q_{b,cal}$, amit σ_{cs} -ként is és $q_{s,i,cal}$, amit τ_p -ként is jelölnek a különböző módszereknek megfelelően számítottuk ki.

$$R_{c,cal} = R_{b,cal} + R_{s,cal} \quad (3)$$

$R_{c,cal}$ - a talpellenállás és köpenymenti ellenállás összege, ami a cölöp törőteherbírás kalkulált értékét adja, amit még tovább kell osztani:

- a korrelációs tényezőjével a karakterisztikus értékhez

- a parciális és modelltényezőjével a tervezési értékhez [5]

2.1 MSZ EN 1997 tervezési segédlet szerint ajánlott módszer (röviden: EUROCODE módszer)

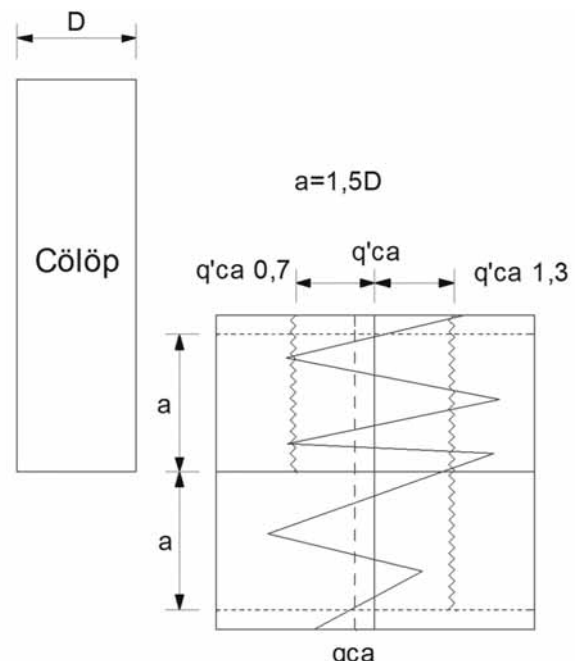
Az MSZ EN 1997-2:2007 D7 melléklet európai szabvány szerinti cölöpteherbírás számítását a Holland szabvány alapján vették át. Ezt az MSZ EN 1997 tervezési segédlet szerint ajánlott módszerrel kiegészítve használtuk. A talpellenállás fajlagos értéke úgy határozható meg, hogy a csúcstól számított lefelé 4D cölöpátmérő és felfelé 8D cölöpátmérő közötti sávot vizsgálunk a szonda csúcscellenállás speciálisan figyelembe vett minimum értékeivel. Ezt a fajlagos értéket megszorozzuk egy olyan α_b tényezővel, amely a cölöpfajtától függ. A köpenymenti ellenállást a köpeny mentén mért szonda csúcscellenállás, illetve annak szükség szerint korrigált értékével adjuk meg, majd ezt

szintén egy készítési módtól függő α_s értékkel szorozzuk meg. [6][7] A kötött talajnál nem fogalmaz világosan a szabvány. A kötött talajok számításánál, ezért a szabvány tervezési segédletében ajánlott c_u drénezetlen nyírószilárdság bevezetésével számoltunk. [5]

2.2. LCPC módszer (Bustamante és Gianeselli által):

Az eredeti eljárás alapján [1]. A módszer a szonda folyamatos csúcscellenállás adatait használja fel.

1. lépés: Kiszámoljuk a q'_{ca} értékét, ami azt jelenti, hogy a csúcs felett és alatt nézett $a = \pm 1,5D$ távolságon kiszámoljuk a szondadiagram átlag értékét.
2. lépés: Eltávolítjuk azokat az adatokat, amelyek nagyobbak, mint $1,3 q'_{ca}$ és azokat is amelyek, kisebbek, mint $0,7 q'_{ca}$, de ezt csak $a = -1,5D$ távon.
3. lépés: A megmaradt adatokból újból kiszámoljuk az átlag értéket $a = \pm 1,5D$ távolságon, mely a végleges q_{ca} -t adja meg. [2]



1. ábra LCPC módszer fajlagos talpellenállás számítása

Ha megvan a speciálisan átlagolt q_{ca} érték, akkor táblázat segítségével meghatározunk egy k_c tényező értékét, amely a talaj típusától függ, annak függvényében milyen cölöpözési eljárással készült. [1]

$$\sigma_{cs} = q_{ca} \cdot k_c \quad (4)$$

A fajlagos köpenymenti ellenállás értékét úgy tudjuk kiszámolni, hogy egy α tényező értéket veszek fel egy másik táblázat alapján, ami szintén a talajtól és a cölöpözési technológiától függ. [1]

$$\tau_p = q_{ca} / \alpha \quad (5)$$

Az σ_{cs} és τ_p adatokból már az ismert alapképlet alapján meghatározható a cölöp teherbírása.

3. VIZSGÁLAT A PRÓBATERHELESI GÖRBE ADATAIVAL

A próbaterhelés 1:1-es modellkísérlet, mely talán a ma ismert teherbírás számítások közül a legpontosabbnak mondható. Egy tipikus próbaterhelés során, minden egyes terhelési lépcsőnél kivárvák a konszolidációt. Ez esetben 1-1 cölöp-próbaterhelés több napig is eltarthat és, ezt a kivitelezők a mai rohanó világban nem akarják/tudják kivárni, ezért még a konszolidációs folyamat közepén új terhelési lépcsőre váltanak. Ez azonban befolyásolhatja a mérési eredmények hitelességét. A klasszikus próbaterheléseket a cölöp töréséig folytatták, hiszen a törőteherből vezették le a határteherbírást. A mai nagytérű és nagy mélységű cölöpöknél a törésig terhelés szinte lehetetlen a nagy teherbírás miatt, ezért más módszerrel kell a törőerőt meghatározni. Ahhoz, hogy megértsük, hogy miért okozhat problémát a görbék kiértékelése, nézzük meg, milyen nehézségek zavarhatják meg a próbaterhelés tervszerű befejezését.

Ilyen, lehet: [8]

- a hidraulikus sajtó kimerülése
- a sajtó meghibásodása
- nincs elegendő ellenteher
- meghibásodik a próbaterhelést végző berendezés
- cölöpfejbeton sarkának tönkremenetele

A nem törésig végzett próbaterheléseket számos módszerrel, például hiperbolikus, logaritmusos, numerikus, de a legismertebb mindkét a grafikus extrapolációval történő kiértékeléssel egészíthetjük ki. [9][10]

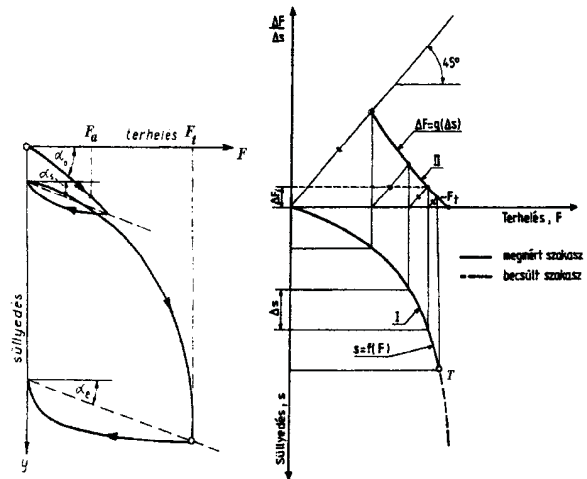
3.1 Grafikus extrapoláció

A statikus próbaterhelés, melynek segítségével meghatározhatjuk a ténylegesen kivitelezett cölöp teherbírását, az egy pontos vizsgálat, de sokszor viszont a cölöpöt nem terhelik, vagy nem tudják a törésig terhelni ($F_t=R_c$), hanem csak egy, azt megelőző pontig szerkeszthető meg a próbaterhelési görbe. Ilyenkor próbáljuk meghosszabbítani a grafikus extrapolációval. A szakirodalomban grafikus interpolációként emlegetik, de a görbe meghosszabbítására, helyesebbnek tartottuk az extrapoláció kifejezést.

Ez a módszer a próbaterhelési görbéből leolvasott állandó értékű Δs süllyedésnövekedéshez tartozó ΔF_i erőnövekményeket ábrázolja egy külön ábrán, mely pontok csökkenő függvénye elmetszi az F tengelyt és így megadja az F_t törőerőt. [3]

Matematikailag, így írható fel [3]:

$$F(s) = F_t(1 - e^{-as}) \quad (6) \quad \frac{dF}{ds} = b[F(s) - F_t] \quad (7)$$



2. ábra Grafikus extrapoláció Mazurkiewicz által [3]

4. MÓDSZEREK KIÉRTÉKELÉSÉNEK MENETE

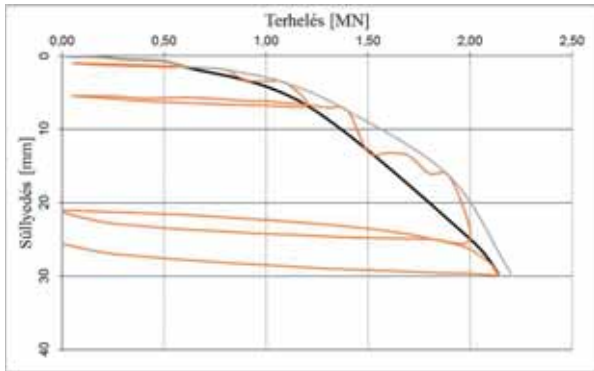
Egy-egy tervezési módszer tapasztalat nélküli használatához nagyon sok irodalom gyűjtésére, szabvány áttekintésére és értelmezésére van szükség.

LCPC módszer: A leírás viszonylag rövid nem túl részletező, de a módszer rendkívül egyszerű és érthető, így a kezdeti rutintalanság után igazán gördülékenyen halad a számítás.

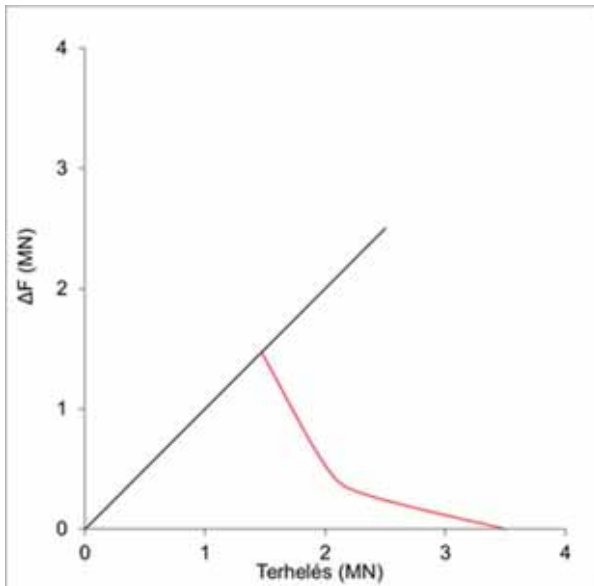
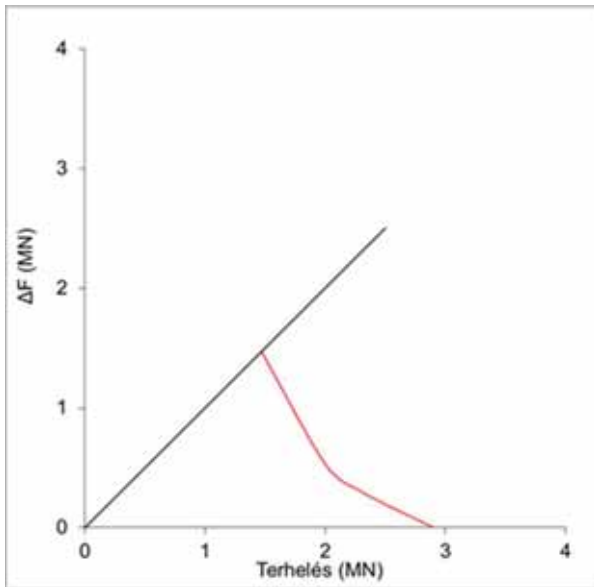
MSZ EN 1997 módszere: A szabványban nem fogalmaznak egyértelműen és a leírásokban is számtalan ellentmondás van. Sok leírás nem foglalkozik a kötött talajokkal, némelyik, pedig azzal a lehetőséggel, amikor kötött talajban van a cölöpcsúcs. A szabvány a hiba okozója, mert nem ad meg konkrét értékeket, csak maximalizált α_s tényezőt tüntet fel a kötött talajokra.

Grafikus extrapoláció: Sajnos a próbaterhelési görbék elkészítésénél nem mindig voltak az egyes terhelési lépcsők konszolidációi kivárvák. A grafikus extrapoláció módszer használata, ezért sokszor nehézségekbe ütközött. A módszer sajnos nem mindig lesz a gyakorlatban olyan szépen megrajzolható, mint a 2. ábrán látható. Ez nemcsak a talajkörnyezet, ezáltal a terhelő erő hatására bekövetkező süllyedés intenzitásától függhet, hanem a mérnök szemétől is, aki az utolsó vonalszakaszt megrajzolja F_t -ig. Ha kevés próbaterhelési lépcső lett elvégezve, akkor távol a töréstől variábilis, azon lehetőségek száma, hogy hogyan fejezzük be a diagramot. A következőkben leírok egy példát, hogy milyen nagy eltérés lehet a módszer két különböző szemmel történő megoldásában.

Egy későbbi kutatásban szeretnénk az irodalomkutatás során megismert számos próbaterhelési görbe kiértékelő módszert is kipróbálni és összehasonlítani, hogy a tapasztalatokból egy kevésbé befolyásolható módszert hozunk létre.



3. ábra A BAH csomópontnál végzett próbaterhelés eredménye



4.-5. ábra Grafikus extrapoláció alkalmazása a BAH próbaterhelési eredményhez többféle nézőpontból

Azért, hogy kiküszöböljük az emberi vonatkozását a grafikus extrapoláció módszerének a NEN 6743 Holland szabvány szerinti törőerő komponensekre bontásával ellenőriztük le az eredmények realitását.

Röviden a törőerő komponensekre bontásához a próbaterhelési görbét kell elemezni, amihez az ellenállások mobilizálódásáról a következőket érdemes tudni. [11] ($F_p=R_{s,cal}$; $F_{cs}=R_{b,cal}$)

A köpenymenti ellenállás mobilizálódása:

$s=5\text{mm}$ -nél $0,5F_p$,

$s=10\text{mm}$ -nél $0,8F_p$ működik, majd

$s=20-25\text{ mm}$ -nél a teljes F_p .

A talpellenállás mobilizálódása:

$s=0,025D$ és $0,5F_{cs}$, az

$s=0,10D$ és $0,8F_{cs}$, valamint az

$s=0,20D$ és F_{cs} adatpárok jellemzik. [11]

A NEN 6743 szabvány módszerével ellentétesen mi nem komponensekre szeretnénk bontani a teherbírást, hanem a törőerőt számoltuk ki összehasonlításként.

1. táblázat A grafikus extrapoláció realitásának ellenőrzése NEN6743-mal

	NEN ell.	Próbaterhelés R_c
LeánykaIII	ok	3,20 MN
LeánykaV	ok	3,50 MN
LeánykaVI	ok	4,20 MN
BAH	ok	3,40 MN
Kelenföld	ok	1,50 MN

Azt vizsgáltuk, hogy nagyságrendileg hasonló eredményt ad-e az ellenőrzés a NEN 6743 módszerrel. Megállapítható, hogy mindegyik a grafikus extrapolációval meghatározott érték hitelesnek tekinthető, de így is szükségesnek tartanánk a próbaterhelési görbe kiértékelésének későbbi kutatását.

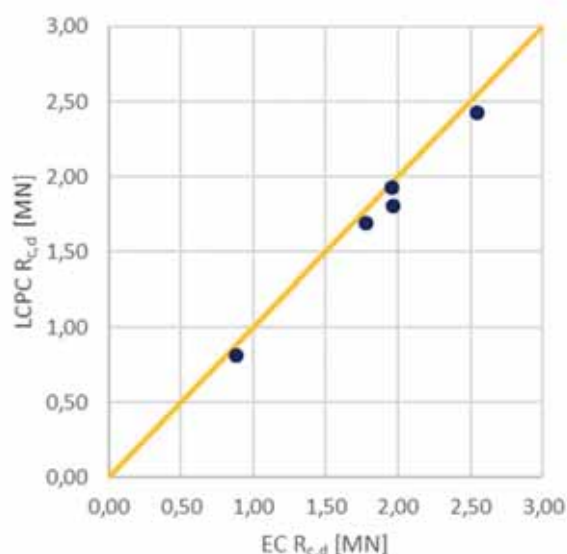
5. EREDMÉNYEK

Mindhárom módszernél számoltunk a megfelelő korrelációs tényezővel, parciális tényezővel és a modelltényezővel. 4 db 0,83 m átmérőjű és 1db 0,53 m átmérőjű fűrt cölöpöt vizsgáltunk, amelyek teherbírásának eltérése a kapott eredményekből is látszik.

2. táblázat Számítási eredmények összehasonlítása

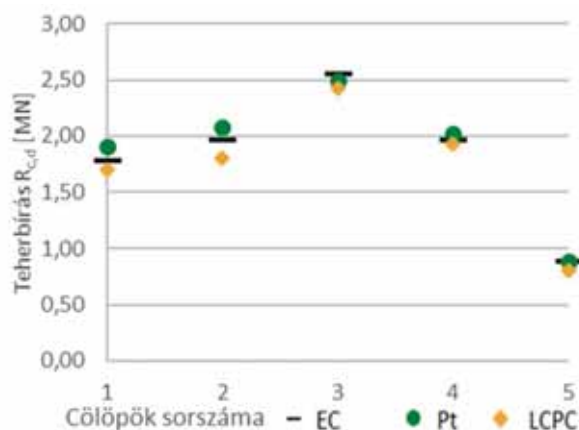
	LCPC $R_{c,d}$	EC $R_{c,d}$	Pt $R_{c,d}$	
LeánykaIII	1,69	1,78	1,90	MN
LeánykaV	1,81	1,97	2,08	MN
LeánykaVI	2,43	2,55	2,50	MN
BAH	1,93	1,96	2,02	MN
Kelenföld	0,81	0,88	0,89	MN

Az eredmények összehasonlításánál látszik, hogy az LCPC módszer óvatosabb becslést ad az MSZ EN 1997 (EC) módszeréhez képest. Az LCPC eredmények átlagosan 94%-os határteherbírást adtak az MSZ EN 1997-hez képest.



6. ábra MSZ EN 1997 (EC) és az LCPC módszerek eredményeinek összehasonlítása

Sajnos a grafikus extrapoláció módszerre nem mondható el, hogy kimutatható egy állandó összefüggés az MSZ EN 1997 módszerrel, sőt egy helyen kisebb is lett a szabvánnyal számított érték.



7. ábra Eredmények összehasonlítása határteherbírási szempontjából

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Összefoglalóan megállapítható az eredmények alapján, hogy

- Sikertült 2 CPT módszert kiválasztani, ahol konzekvensen azonos vagy hasonló teherbírást

kapunk, de a próbaterheléssel ez nem mutatható ki, pedig az igazolná a CPT alapú módszereket.

- A grafikus extrapoláció módszere összehasonlítható eredményt ad az MSZ EN 1997 és LCPC módszerrel, de ha jóval a törőteher előtt abbahagyják a próbaterhelést kétséges a helyes alkalmazása, ezért pont a legpontosabbnak vélt próbaterhelési adatok nem adnak megbízható eredményt.

Ezt a néhány cölöpöt feldolgozó kutatás is igazolja, hogy még mindig nagy szükség lenne egy univerzális tervezési módszerre, amely bármely talajviszony mellett könnyen alkalmazható.

SUMMARY

It can be stated on the basis of the result that

- *We have succeeded in selecting 2 CPT methods where consistently equivalent or similar loads are obtained, but with the test load this can not be demonstrated, even if it justifies CPT-based methods.*
- *The graphical extrapolation method gives a comparable result to the MSZ EN 1997 and LPCP method, but if the test load is stopped well before the ultimate load, it is doubtful that the correct test results are not reliable.*

This research on a few piles also suggests that there is still a great need for a universal design method that can be easily applied in any soil conditions.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönet illeti az Lechner Tudásközpont Építési Geotechnikai Adattárát, Imre Emőkét és Nagy Ferencet segítő munkájukért.

8. IRODALOM

- [1] Bustamante, M., Gianceselli, L. (1982): Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT, Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, 493-500
 - [2] De Cock, F., Legrand, C. (1997): Design of Axially Loaded Piles European Practice, A. A. Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 873 8
- Bustamante, M., Frank, R. (1997): Design of axially loaded piles – French practice 161-175
 Everts, H., J., Luger, H., J. (1997): Dutch national codes for pile design 243-265

- [3] Farkas, J. (2001): Alapozás, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 94-124
- [4] Fleming, W.G.K., Weltman, A.J., Randolph, M.F., Elson, W.K. (1985): Piling Engineering, John Wiley and Sons, New York, ISBN 0-903384-35-3, 95-117
- [5] Magyar Mérnöki Kamara (2012): Alapozások és földmegtámasztó szerkezetek tervezése az MSZ EN 1997 szerint
- [6] MSZ EN 1997
- [7] Szabó, V., Imre, E., Mahler, A. (2004): Mélyalapok próbaterhelés és statikus szondázás alapján számolt teherbírásának összehasonlítása, Geotechnika 2004 konferencia, Ráckeve
- [8] Szabó, Gy. (1975): Cölöpteherbírásszámítás és cölöpalapozástervezés, Budapesti Műszaki Egyetem Továbbképző Intézet, Budapest
- [9] Szabó, Gy. (1978): Cölöp teherbírásszámításának meghatározása, Tervezési segédlet FTI, Budapest
- [10] Szabó, Gy. (1981): A cölöp-próbaterhelések értékelése, Mélyépítéstudományi Szemle 31. évf. 7. szám, Budapest, 298-304
- [11] Szepesházi, R. (2001): A CFA-cölöpök hazai alkalmazásának módszerei és tapasztalatai, Közúti és Mélyépítési Szemle 51. évf. 5. szám, 171-179
- [12] Szepesházi, R. (2008): Geotechnika, egyetemi jegyzet harmadik kiadás, Győr, 81-96.
- [13] Telekes, G. (1983): Cölöppróbaterhelési eredmények gyűjteményének felhasználása a dinamikai paraméterek meghatározásához MŰSZAKI TERVEZÉS 23:(7) pp. 32-35.

SÍKKEREKES HULLÁMHAJTÓMŰ FEJLESZTÉSE A K.K.K. 99 KFT-NÉL

DEVELOPMENT OF A FLAT WHEEL HARMONIC DRIVE AT K.K.K. 99 CO. LTD.

*Kardos Szilárd tanszéki mérnök,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék
Dr. Krisch Róbert ügyvezető
K.K.K. 99 Kft.*

ABSTRACT

The functions of the principal members of a flat-wheel harmonic drive are similar to the functions of a traditional harmonic drive, but the features of the flexible and the solid wheels are different. This paper reports the optimization of the basic elements of an experimental flat wheel harmonic drive developed by engineering office K.K.K.99. The stresses rising in the flexible bearing due to deformation by the wave generator were analyzed with the FE method. Deformation results were used to determine the tooth parameters based on generator cam surface.

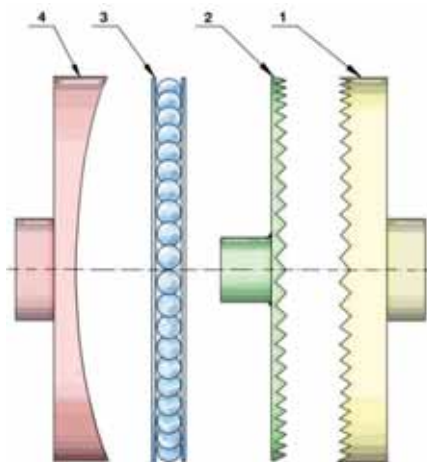
1. BEVEZETÉS

A K.K.K. 99 Kft. a GINOP 2.1.7-15 pályázat keretében támogatást nyert síkkerekes hullámhajtóművek fejlesztésére és prototípusainak legyártására. Ezek megfelelő működéséhez elkerülhetetlen, hogy a rugalmas és merev kerék kapcsolódásának paraméterei (deformáció mértéke, fogprofilok, foghézagok nagysága stb.) biztosítsák a két fogazott alapelem fogfej-ütközés és fogfej-interferencia nélküli kapcsolódását. Ehhez ismernünk kell a rugalmas kerék deformált alakját, melyet végeleselemes módszerrel határoztunk meg. Jelen publikáció a hullámhajtómű [1] alapelemek fejlesztésének főbb lépéseit mutatja be.

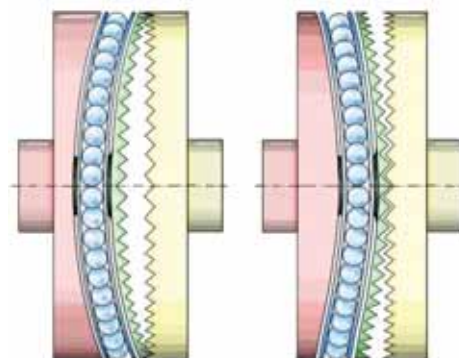
2. A SÍKKEREKES HULLÁMHAJTÓMŰ MŰKÖDÉSE, A VIZSGÁLATI MÓDSZEREK ISMERTETÉSE

A síkkerekes hullámhajtómű működési elvét tekintve nem különbözik a hullámhajtás alapelvétől, tulajdonképpen a hengeres kerekes fogaskerék-hullámhajtómű [1] különleges változatának tekinthető.

Az 1. ábrán a hajtómű alapelemei láthatók. A kéthullámú generátorban a bűtyök munkafelülete két, a hajtómű tengelyére merőleges síkkal β_g szöget bezáró síkfelület, amely egy rugalmas, axiális golyócsapágyon keresztül deformálja a hullámkereket. A hajtómű hullámkereke egy sík tárcsa, amely homlokfelületének peremén lévő fogazat deformált állapotban kapcsolódik (2. ábra) a merev kerék homlokfogazatával, a két kerék coaxiális helyzetű.

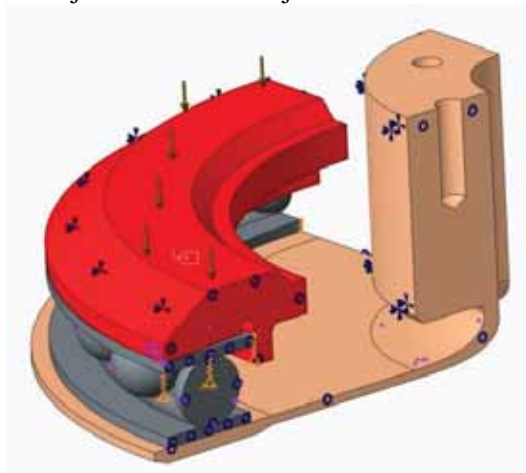


1. ábra: A síkkerekes hullámhajtómű alapelemei: merev kerék (1), hullámkerék (2), rugalmas csapágy (3,) bűtykös hullámgenerátor (4)



2. ábra: Fogkapcsolódás vázlat a fogkapcsolódás síkjára normális (baloldal) és párhuzamos (jobb oldal) nézetben

A hullámkereket itt a hullámgenerátor axiális irányban deformálja, a hagyományos változatnál működő radiális iránnyal szemben. A deformáció vizsgálatára alkalmas a végeleemes analízis, ehhez a PTC Creo CAD rendszer szimulációs modulját használtunk. A hullámkerék különböző mértékben deformálható, azonban jelen konstrukcióban a tervezett axiális irányú elmozdulás 1,2 mm (4. ábra). Ekkora az elméleti érték a tervezett üzemi állapotban is, így mindegyik vizsgálatnál ezzel számoltunk. Az alapelemek végeleemes modelljét a 3. ábra mutatja.



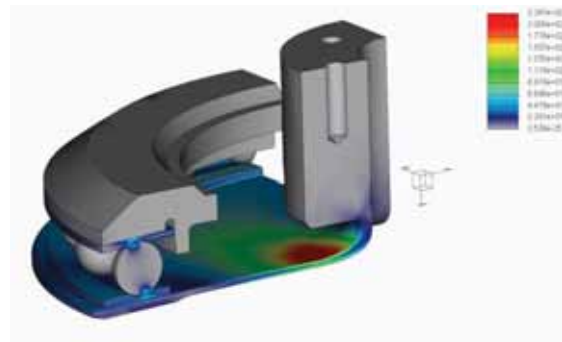
3. ábra: A hullámhajtómű végeleemes modellje

2. A SÍKKERES HULLÁMHAJTÓMŰ ALAPELEMEINEK OPTIMÁLÁSA

A hullámgenerátor csapágy terhelésének jelentős részét képezi a deformált alak előállításából ébredő axiális erő. Annak érdekében, hogy a hullámgenerátor csapágy élettartamát megnöveljük, a rá eső axiális erő csökkenthető a rugalmas elemek kisebb deformálásával illetve a rugalmas elemek „lágýtásával”. Az előbbi megoldás korlátozott, mivel a fogkapcsolódáshoz szükséges a megfelelő deformáció kialakítása, míg utóbbi a rugalmas csapágy és a hullámkerék méreteinek módosításával érhető el. A rugalmas csapágy esetén a deformációhoz szükséges erőt leginkább a csapágy futófelületének vastagsága határozza meg. Ennek a méretét a lehető legkisebbre választottuk, úgy hogy még ne befolyásolja hátrányosan a működést és az élettartamot.

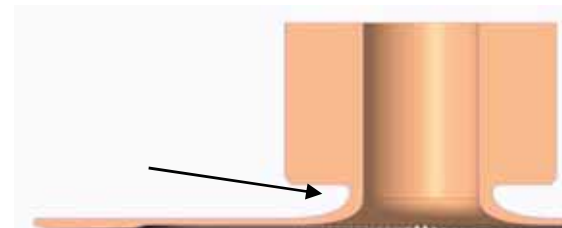
A csapágygyűrűt a mindkét oldaláról lemunkáltuk, így kevésbé mély futófelületet állítottunk elő, ezáltal alatta nem vékonyodik el túlzottan a csapágygyűrű. Továbbá ügyeltünk, hogy a deformált

állapotban a csapágygolyók és a csapágygyűrű közötti terhelésátadás maradjon a futófelületen belül (7. ábra). Túl sekély futófelület esetén deformált állapotban a golyók a futófelület szélén adják át a terhelést, amely élemti érintkezést eredményez, amit szeretnénk elkerülni.



4. ábra: Feszültség eloszlása a teljes modellben

A hullámkerék esetén a deformációból származó erőt leginkább befolyásoló paraméterek a hullámkerék vastagsága és a fogazat-agy távolság. Az előbbi paraméter csökkentésével az utóbbi növelésével redukálható a deformációval szembeni ellenállás, azonban a méretek módosítását korlátozza, hogy a hullámkerék terheli a hajtásból származó csavaró nyomaték, továbbá a vastagság túlzott csökkentése gyártási nehézségekbe is ütközik.



5. ábra: Hullámkerék deformálódó tárcsa és agy csatlakozása

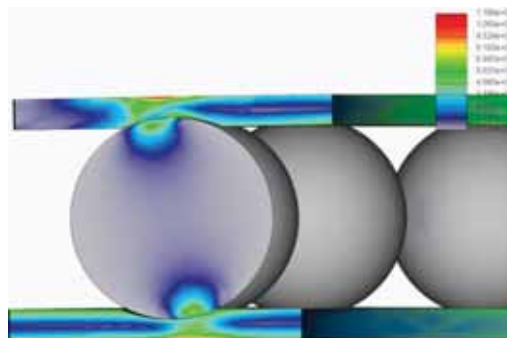
A hullámkerék deformálódó tárcsa része nem közvetlenül csatlakozik az agy részhez, hanem az agy tövében egy íves beszúrás alakítottunk ki, amelyet a fogazat oldali felület is közel párhuzamosan követ (5. ábra).

Az így elvégzett méretbeli és konstrukciós módosításokkal 1,2mm-es deformációhoz szükséges axiális erőt a végeleemes számítások szerint sikerült 260N-ról 51N-ra csökkenteni. A rugalmas elemek méreteinek meghatározása során a hullámgenerátor bütökprofil szög értékére egy kezdeti értéket

határoztunk meg. Megvizsgáltuk, hogy a bütyökprofil szögének módosítása milyen hatással van a feszültség eloszlásra az előzőleg meghatározott méretek mellett.

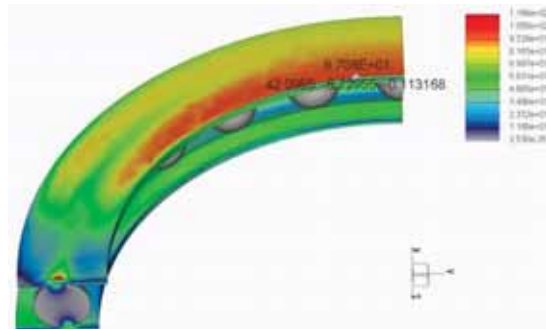


6. ábra: Hullámgenerátor bütyök és rugalmas csapágy érintkezése deformálatlan állapotban



7. ábra: A csapágygolyó feszültség eloszlása deformált állapotban

Azt találtuk, hogy a deformált állapotban a rugalmas csapágy és a hullámgenerátor között a felfekvő felület növelésével csökkenthető a csapágyban ébredő feszültség. A deformált rugalmas csapágyban ébredő feszültség legkisebb értékét akkor kaptuk, amikor a hullámcsúcson a hullámgenerátor felületre a rugalmascsapágy teljes szélességében felfekszik.

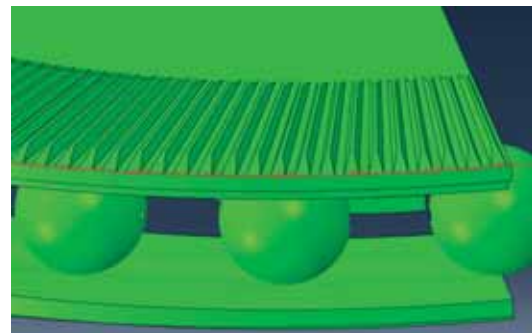


8. ábra: Rugalmas csapágyban ébredő feszültségek

A bütyök profilszögének módosításával sikerült rugalmas csapágyban ébredő Von Mises szerinti feszültség maximális értékét 121MPa-ról 99MPa-ra csökkenteni. A deformációból származó axiális erő és a hullámkerékben ébredő feszültség érdemben nem változott.

3. FOGAZAT PARAMÉTEREINEK MEGHATÁROZÁSA

Az előző fejezetben bemutatott alapelemek méreteinek meghatározása után megvizsgáltuk a hullámkerék deformált alakját terheletlen állapotban (csavaró nyomaték nem terhelte a hullámkereket), és lekérdeztük, 4.5°-onként az elmozdulás értékeket a fogazat külső és a belső peremén.



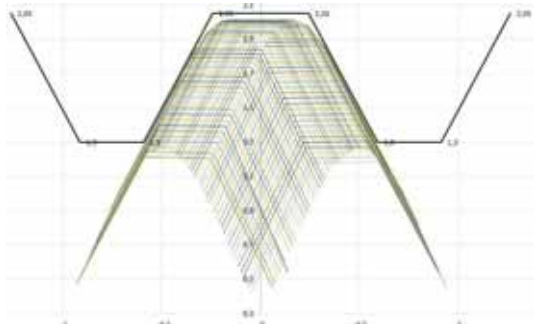
9. ábra: Mintavételezés a külső peremen

Az ív menti elmozdulás értékekből kapott ponthálóra ötöd fokú polinomot illesztettünk, majd ezt a polinomot használtuk a hullámkerék fogazat pályájának meghatározására.

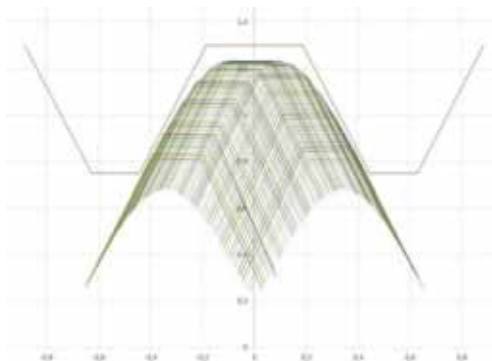
A fogazat számításánál azt feltételeztük, hogy a fogazat egy pontját az előbbieken meghatározott polinom vezérli és erre a polinomra egy fog szimmetriasíkja mindig merőleges. A fogazat meghatározásánál figyelembe vettük a fogazat axiális irányú elmozdulását illetve elfordulását a merev fogazathoz képest.

Jelen hajtómű esetén egyenes fogprofil határoztunk meg. A hullámkerék és a merevkerék fogprofil szöge a külső és a belső perem között nem változik. A fogazat elmozdulása koordináta transzformációval meghatározható a teljes hullámon. A merevkerék fogprofilját 25°-ban határoztuk meg, és ehhez kerestünk egy illeszkedő hullámkerék profilszöget. A fogazat billenése miatt a hullámkeréken a merevkeréknél kisebb fog profilszöget határoztunk meg és törekedtünk arra, hogy a foghézagot terheletlen állapotban is jelentősen lecsökkentsük. A

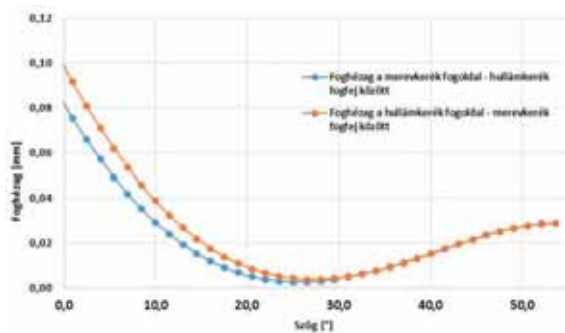
foghézag értékei a kerület mentén, a külső peremen a 12. ábrán láthatóak, illetve a belső peremen a 13. ábrán.



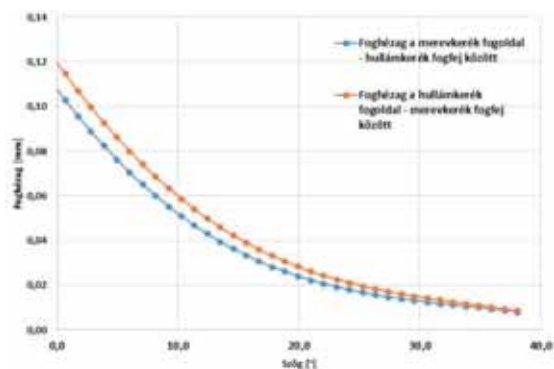
10. ábra: Hullám fogazat mozgása a merev fogazathoz képest a külső peremen



11. ábra: Hullám fogazat mozgása a merev fogazathoz képest a belső peremen



12. ábra: Foghézag értéke a külső peremen



13. ábra: Foghézag értéke a belső peremen

A fogazat értékeit úgy határoztuk meg, hogy a külső peremen kisebb foghézag értékeket kapjunk, így terhelés hatására a külső peremen kezdődik a terhelés, ahol a fogazat nagyobb teherbírású.

A fenti számítások alapján meghatároztott síkkerekes hullámhajtómű prototípus alapelemei a 14. ábrán láthatók.



14. ábra: A legyártott alapelemek

8. ÖSSZEFOGLALÁS

Szimulációs módszert dolgoztunk ki a hullám-generátor valamint a hullámkerék alakjának optimalására és a rugalmas csapágyban ébredő feszültségek vizsgálatára. Az adott hullámkerék deformációhoz tartozó - működés szempontjából kedvezőtlen - axiális erő értékét ~80%-kal, míg a csapágyban ébredő kezdeti feszültség értékeket optimalás után 20%-kal sikerült csökkenteni. Az optimált alapelemek deformált alakja jelentette a fogazati paraméterek számításának alapját. A hullámhajtómű prototípusainak gyártása és tesztelése a K.K.K. 99 Kft. celldömölki székhelyén jelenleg is folyamatban van. További célkitűzés a hajtómű teherbírásának, alkalmazható fordulatszám tartományának, pozicionálási pontosságának és egyéb működési paramétereinek feltérképezése.

10. IRODALOM

- [1] www.harmonic-drive.com
- [2] Krisch R.: Síkkerekes hullámhajtóművek fejlesztése, PhD értekezés, BME, 2010.

ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁBAN ALKALMAZOTT ANYAG SZILÁRDSÁGI JELLEMZŐINEK VIZSGÁLATA A 3D NYOMTATÁS PARAMÉTEREINEK FÜGGVÉNYÉBEN

INVESTIGATING THE STRENGTH PROPERTIES OF A MATERIAL USED IN ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY DEPENDING ON THE PARAMETERS OF 3D PRINTING

Dr. Kátai László PhD, Dr. Szabó István PhD., Lágymányosi Attila, Lágymányosi Péter, Dr. Szakál Zoltán PhD.

Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar

ABSTRACT

The main objective of this paper is to analyse the mechanical behaviour of a wide range of 3D printed materials produced by different filling technology. We performed a tensile test of specimens printed with different filling patterns and fill rates. It can be stated that optimizing the fill pattern and the fill rate for the application area can be achieved by material and, together, cost savings. In the case of the examined samples, Concentric filling is best suited for optimizing printing for material use.

Keywords: Additive manufacturing, FDM technology, strength property, 3D printing

1. BEVEZETÉS

A 3D nyomtatási technológiák egyre népszerűbbek a hagyományos gyártási technológiák mellett. Az igen sokféle nyomtatási technológia közül az ún. FDM (Fused Deposition Modeling) technológiát választottuk a vizsgálatunk tárgyává. Ez a technológia a prototípus-, és a kis darabszámú alkatrészgyártásban kisebb nagyobb cégeknél és egyéni vállalkozóknál is egyaránt nagy felhasználásnak örvend. Az egyre nagyobb népszerűség miatt mindenképpen célszerű foglalkozni a termék minőségét is meghatározó egyik tulajdonsággal a teherbíró képességgel, mivel a nyomtató a testeket bizonyos mértékben esetenként akár teljesen üregesen is ki tudja nyomtatni, amely anyagmegtakarítást is eredményezhet. A nyomtatás során lehetőség van annak kiválasztására, hogy milyen kitöltési formával szeretnék dolgozni [1, 2]

A kísérleteink célja annak vizsgálata, hogy különböző térkitöltöttségű és kitöltési mintájú próbatesteknek hogyan változik a teherbírása,

milyen kapcsolat állapítható meg az anyagmegtakarítás és a teherbírás csökkenés között.

2. A VIZSGÁLATHOZ VÁLASZTOTT ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A vizsgált anyagnak a PLA (polylactic acid) anyagot választottuk a szakirodalom kutatás alapján - széleskörű alkalmazhatósága, ár-érték arány -, PLA (Polylactic acid, PLA) magyar nevéen politejsav, biológiai úton lebomló, hőre lágyuló műanyag, melyet növényekből állítanak elő. Elsősorban magas keményítőtartalmú gabonafélékből (rizs, búza, kukorica) lehet előállítani, tejsavas erjesztéssel, polikondenzációval vagy dilaktid polimerizációval. Ez az anyag nagyon elterjedt és a többi alapanyaghoz képest kedvezőbb az ára. Felhasználási köre igen széles és elterjedt az átlag felhasználók körében, mivel nyomtatásához nem feltétlenül szükséges –bár a nyomtatási minőség szempontjából ajánlatos – a fűthető asztal, mint például egy másik igen elterjedt anyagnál az ABS (akrilnitril-butadién-sztirol)-nél. A PLA előnyei közé tartozik még, hogy nagyobb sebességgel nyomtatható, de ugyanakkor kisebb hőfokon, mint az ABS. Nyomtatás során az anyag deformáció is jelentősen kisebb, mint az ABS esetében. Ezeket alapul véve a nyomtatás szempontjából egy olcsó, ugyanakkor könnyen kezelhető és nagyon széles körben felhasznált anyagról van szó. Ennek megfelelően egy bq-márkanévvel rendelkező sárga PLA filament került beszerzésre és a próbatestek ebből az anyagból lettek kinyomtatva. [3, 4]

Próbatest:

A szakítási vizsgálathoz szabványos próbatesteket alkalmaztunk, ennek megfelelően a polimerek szakításvizsgálatára vonatkozó MSZ

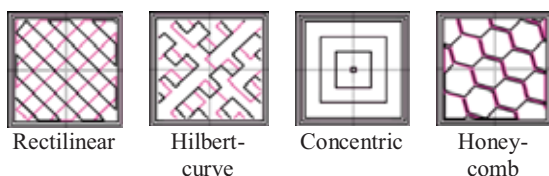
EN ISO 527-2-1993(E) szabványt alapul véve 1A testet választottuk (1. ábra)



1. ábra. Az elkészült szabványos méretű próbatestek

Kitöltési minták:

A programban kiválasztható kitöltési mintákat a 2. ábra szemlélteti.



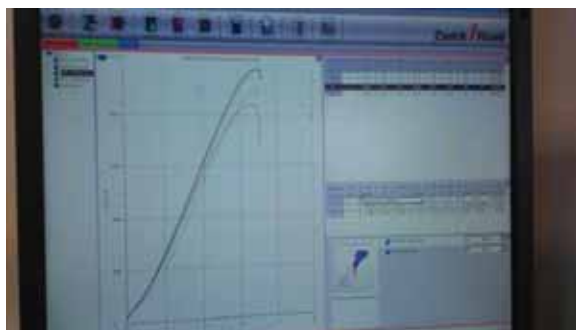
2. ábra. A kitöltési minták

A mérések során 40%, 60%, 80% és 100% térkitöltési eseteket vizsgáltunk.

A szakító vizsgálatok Zwick/Roell Z100 típusú szakítógéppel történtek, a méréseket 3-szoros ismétléssel végeztük el.

3. A VIZSGÁLAT ÉRTÉKELÉSE, EREDMÉNYEK

A szakítási vizsgálatok eredményeit a szakítógéppel mért programja szolgáltatja (3. ábra)



3. ábra. A szakító diagram

Az eredmények feldolgozására, értékelésére excel programba történő exportálást követően került sor.

A térkitöltés függvényében a teherbírás változása:

Kitöltési mintánként az egyes térkitöltési százalékokat erő- megnyúlás diagramokon ábrázoltuk. A diagramokon ábrázolt próbatest szakítási eredmények közül, a legkisebb szakítási erővel rendelkező adatsorokat választottuk, mert így azokat az értékeket vettük fel, amelyeket biztosan teljesít a másik két próba test is. Az adatsorokat egy Excel munkafüzetbe a négy

különböző kitöltési mintának megfelelően négy diagramon mutatjuk be, ahol az ábrázolt pontok száma a szakító gép által eltárolt mérési pontokkal megegyezően 2000-3500 darab. Emiatt ezeket az adatokat vonaldiagramban ábrázoltuk.

Jelen dolgozatunkban csupán a térkitöltésenkénti összevetéseket mutatjuk be, az erő-megnyúlás diagramok segítségével.

A megnyúlás elemzése: A 4. ábrán látható diagramokról leolvasható, hogy mind a négy térkitöltés esetében a Concentric és Rectilinear mintájú kitöltések közel azonos megnyúlásokat produkáltak függetlenül a teherbírástól. Egyértelműen látszik, hogy a Hilbertcurve kitöltés minden esetben sokkal kevesebb megnyúlásra volt képes, mint a többi mintájú kitöltés, és ehhez mérten jóval kisebb a terhelhetősége. A Honeycomb kitöltés 60 és 80 %-os térkitöltés esetében közel annyira nyúlt meg, mint a Rectilinear és a Concentric kitöltés. A diagramok is egyértelműen mutatják, hogy a kitöltési mintáknak és térkitöltési százalékoknak is nagy jelentősége van az anyag nyúlási tulajdonságaira nézve.

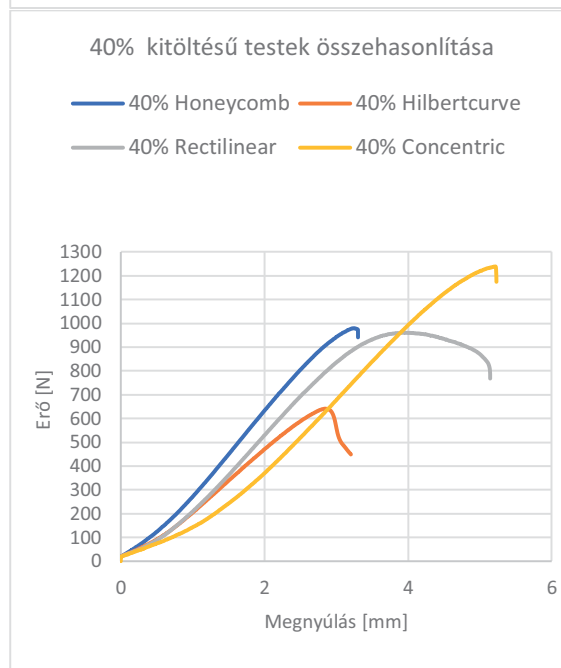
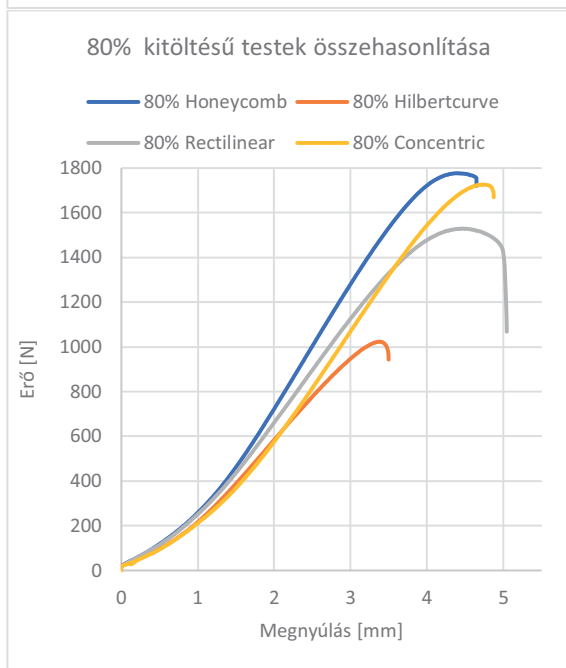
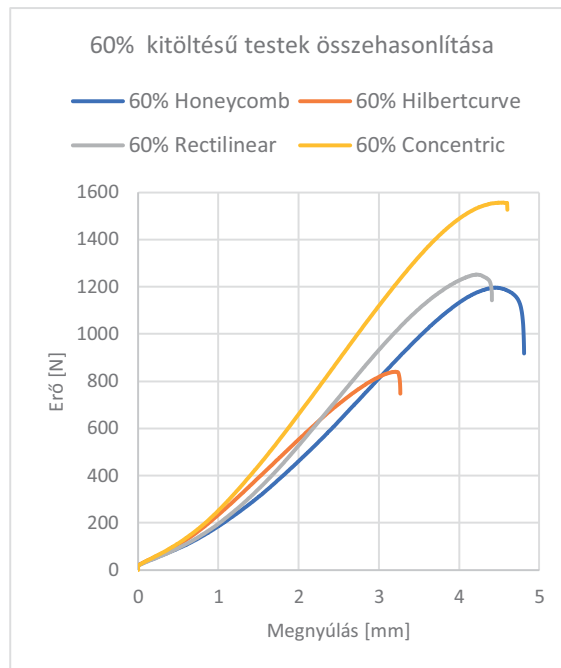
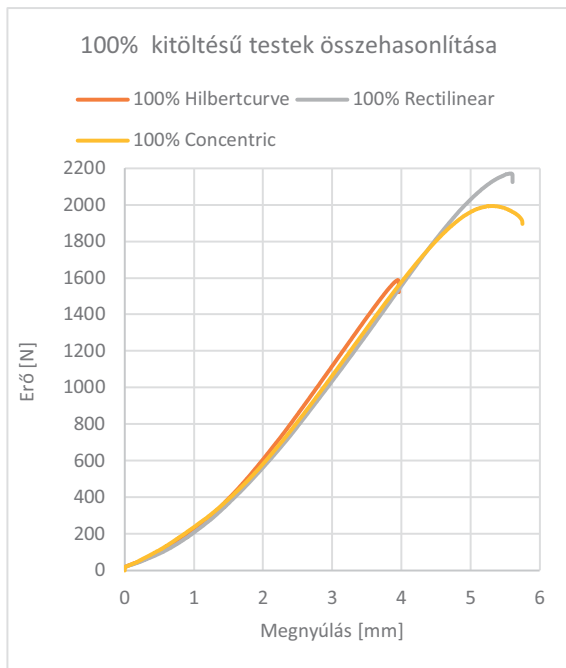
Terhelhetőség elemzése:

A Concentric mintájú testek közül a 40 és 60 %-os térkitöltések, jóval erősebbnek bizonyultak a többi mintájú kitöltéshez képest. Ez az előny a 80 és 100 %-osnál már nincsen meg, sőt itt már nem a Concentric kitöltésű testek bizonyultak a legerősebbnek. Ellenben nem sokkal marad el a Honeycomb-tól a 80 %-os kitöltöttség esetében és a 100 %-os kitöltöttség esetében pedig a Rectilinear mintájú kitöltéstől. Az ábrákon még az is jól látható, hogy a Honeycomb 80 %-os kitöltés esetében teljesít kimagaslóan, míg 100 %-os kitöltésnél a Rectilinear mintájú próbatestek. A mérések során a Hilbertcurve minden esetben a leggyengébbnek bizonyult.

Anyagmegtakarításhoz tartozó teherbírás csökkenés elemzése:

A következő részben (5. ábra) elemezzük, majd összehasonlítjuk a különböző mintájú kitöltéseket, a valóságos anyagmegtakarításhoz tartozó teherbírás szerint. Az alábbiak szerint határoztuk meg a valóságos anyagmegtakarításokat.

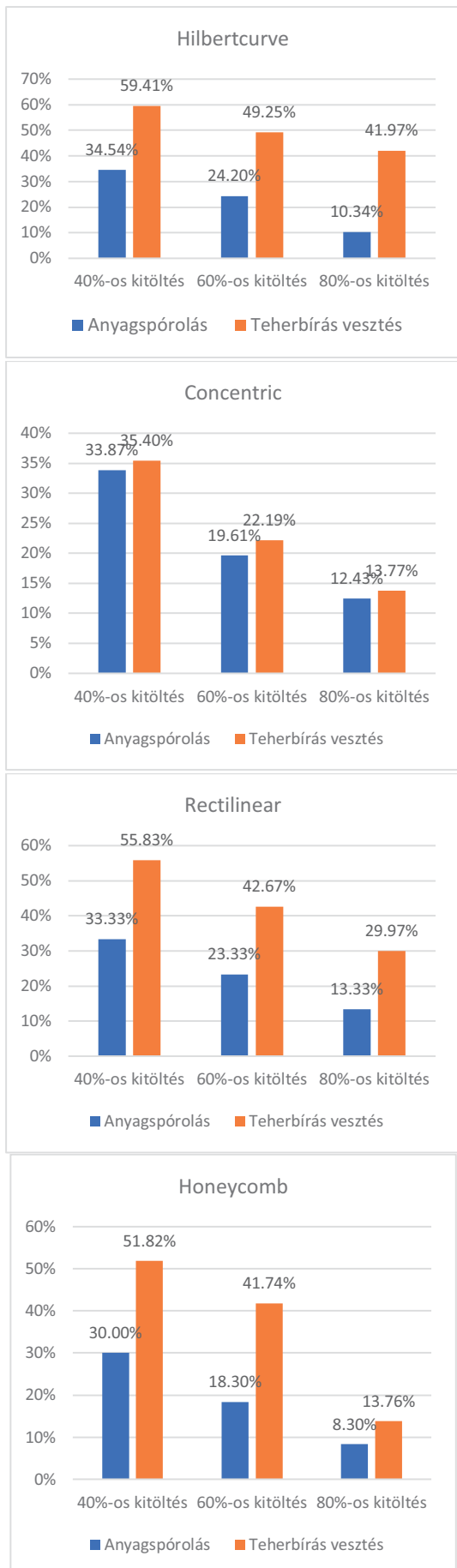
$$\text{Valóságos anyagmegtakarítás}[\%] = 100\% \text{ térkitöltés}[\%] - \text{Valóságos térkitöltés}[\%]$$



4. ábra. A különböző térkitöltések (100%, 80%, 60%, 40%) esetén elvégzett vizsgálatok eredményei

A teherbírás veszteség kiszámolásához az adott mintájú kitöltés tömör testek teherbírásának maximumait átlagoltuk és vettük alapul. Ugyanebből a mintájú kitöltésből a többi térkitöltés esetén is hasonlóan jártunk el, és a maximumértékeket átlagoltuk. Ezt követően hasonlítottuk a tömör kitöltésű testek átlagolt eredményeihez képest a többi térkitöltés átlagolt értékeit.

$$\text{Teherbírás veszteség}[\%] = \frac{1}{A} \frac{\text{Adott térkitöltésű testek legnagyobb teherbír. átlaga [N]}}{\text{A tömör testek legnagyobb teherbír. értékeinek átlaga [N]}} * 100$$



5. ábra. A különböző térkitöltések esetén az anyagmegtakarítás és a teherbírás közötti kapcsolat

Az 5. ábrán látható diagramokat összehasonlítva megfigyelhető, hogy a Concentric mintájú kitöltések esetén volt a leginkább arányban az anyagmegtakarítás a teherbírás csökkenéssel. A Concentric tömör testhez képest lényegében amennyi anyagot megtakarítunk annak megfelelő teherbírást csökkenés következik be. Ez ellentétben az összes többi mintájú kitöltésnél a teherbírás csökkenés jelentősebb mértékű, mint a hozzá tartozó anyagmegtakarítás. A Concentric kitöltésű testeket kivéve a többi mintánál igen jelentős - az anyagmegtakarításnak 1,5-2,5 szerese - a teherbírás csökkenés.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A legnagyobb terhelhetőségbeli eltéréseket összességében a Hilbertcurve kitöltés esetén tapasztaltó. A legegységesebbnek pedig a Rectilinear mintájú kitöltés bizonyult. Erőmegnyúlás szempontjából a vizsgált próbatestek, az esetek többségében, adott kitöltési minta mellett függetlenül a kitöltés sűrűségétől, hasonlítanak egymásra. Ennek oka valószínűleg a nyomtatási szálak helyzetére vezethető vissza. Megállapítható, hogy három kitöltési minta esetében a legnagyobb erőnövekedés 80 és 100 % kitöltési arány között tapasztalható. A Concentric mintájú testek közül a 40 és 60 %-os térkitöltésűek, jóval erősebbnek bizonyultak a többi mintához képest. A 80 % esetében a legerősebb átlagosan a Honeycomb, 100% térkitöltés esetében pedig a Rectilinear volt. Valóságos térkitöltés szempontjából megállapítható, hogy a 4 térkitöltés közül 3 esetben is a Concentric mintájú nyomtatványok előállításához volt szükség a legkevesebb anyag felhasználására. Tehát olyan esetben, amikor az anyagfelhasználás minimalizálása a cél, a Concentric mintájú kitöltés választása a célszerű.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] KÁTAI et.al.: CAD tankönyv. Typotex Kiadó, Budapest, 2012. ISBN 978-963-279-534-8
- [2] Joe Micallef: Beginning Design for 3D Printing, 2015. ISBN 978-1-4842-0946-2
- [3] S. Junk, M. Bambach: Application of 3D (color) printing for the visualization and optimization of complex metal forming process, Procedia Engineering 207 (2017) 1081-1086.
- [4] A. Gebhardt, J.-S. Hötter, Additive Manufacturing - 3D Printing for Prototyping and Manufacturing, Hanser, Munich, 2016

A cikk az EFOP-3.6.1.-16-2016-0016 projekt támogatásával készült

ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁVAL ELŐÁLLÍTHATÓ RUGALMAS MŰANYAGOK VIZSGÁLATA

TESTING OF FLEXIBLE PLASTICS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY

Kis Katalin^{*}, Dr. Ficzer Péter^{**}, Dr. Kovács Norbert Krisztián^{***}, Dr. Szabó Gábor^{***}

ABSTRACT

My theme is the testing of flexible plastics produced by additive manufacturing technology. The main point will be in the flexible polymer, Soft PLA.

Polylactic acid is a biopolymer that can be produced from sugar of corn, rice or wheat. Soft PLA is a new material which has high flexibility so it is suitable as gasket, but we have almost no information about its mechanical properties and its integrity. [1]

PLA materials are easy to printing and the printed surface has high quality so it is the most commonly used printer material for FDM printers. [1]

Our thesis aims to investigate the ideal print conditions of the Soft PLA material, and then determine the material laws, material properties, and print properties for the printed prototypes to study how the printing directions affect the mechanical properties.

During our thesis, after setting the correct printing parameters, I print the test pieces in 3 different positions and then, by tensile test, I examine the voltage stretching diagram of the Soft PLA material and whether the printing directions are different and, if so, then what will I determine the strength and modulus of the material.

1. BEVEZETÉS

Manapság egyre nagyobb szerepe van a termékek élettartamának. Ehhez megfelelő tervezés, szimuláció és egyéb méretezési - és tervezési eljárások szükségesek. A vizsgálatokhoz szükséges konstrukciós kialakításokban nagy segítséget jelentenek az additív gyártástechnológiák. Ennek az eljárásnak a lényege, hogy felépítő elven, rétegről-rétegre állítjuk elő a kívánt munkadarabokat. Azonban a méretezési eljárások mit sem érnek, ha nem ismerjük a technológia sajátosságait, valamint a technológia során használt anyagok mechanikai tulajdonságait. [2] [3] [4]

Vizsgálatunk során a huzalfelrakásos, más néven 3D extrudálásos (FDM) eljárással készülő rugalmas műanyag vizsgálata a célunk.

^{*} BSc hallgató, BME-Járműelemek és Jármű-szerkezetanalízis Tanszék
^{**} adjunktus, BME-Járműelemek és Jármű-szerkezetanalízis Tanszék
^{***} adjunktus, BME-Polimertechnika Tanszék

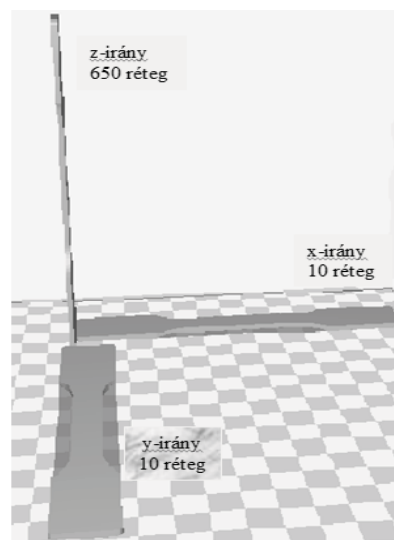
Ez az anyag, melyet Soft PLA-nak hívnak, alkalmas lehet tömítések, és egyéb rugalmas alkatrészek gyártásához. [1] Azonban, hogy alkalmazni tudjuk ezeket az alkatrészeket, szükséges az anyag mechanikai tulajdonságainak az ismerete.

Vizsgáltuk a rugalmas anyag ideális nyomtatási paramétereit, valamint meghatároztuk a méretezéshez szükséges anyagtvényeket és anyagjellemzőket.

2. VIZSGÁLATHOZ SZÜKSÉGES PRÓBAPESTEK NYOMATÁSA

2.1. Húzó- és nyomó próbatetek

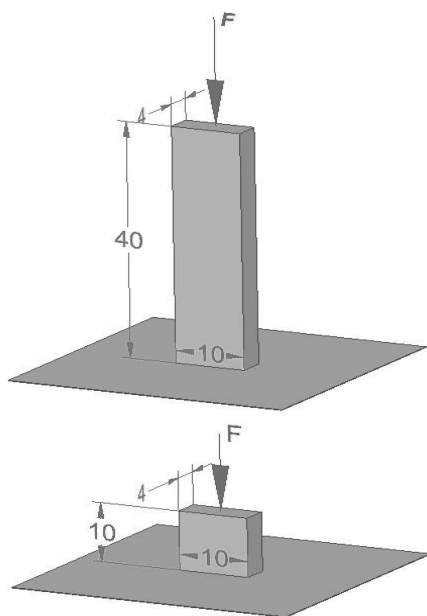
Vizsgálatunk során az időtől nem függő anyagi jellemzők meghatározása a célunk. Ehhez húzó- és nyomó próbatetekre van szükség. A húzó próbateteket 3 különböző pozícióban nyomtattuk, ennek képe az 1. ábrán látható.



1. ábra: Húzóvizsgálathoz használt próbatetek 3 nyomtatási pozíciója, valamint a rétegek száma

A nyomóvizsgálatoknál 2 különböző próbatest nyomtatására van szükség. Az egyik segítségével a

nyomó rugalmassági modulus meghatározása a cél, a másik esetben pedig a nyomószilárdság.

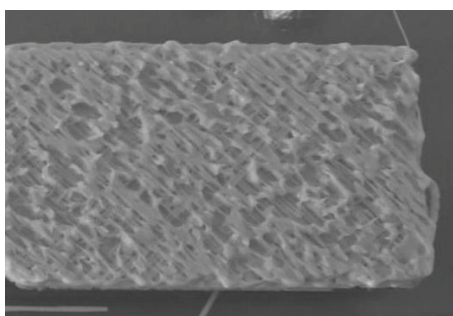


2. ábra: Nyomóvizsgálathoz használt próbatestek [4]

Minden új anyag készítésénél tanulmányozni kell a nyomtatás feltételeit. Ez esetben is vizsgálni kell az ideális nyomtatási paramétereket, valamint az anyag - és az FDM technológia nyomtatási sajátosságait.

2.2. Nyomtatási problémák és azok kiküszöbölése

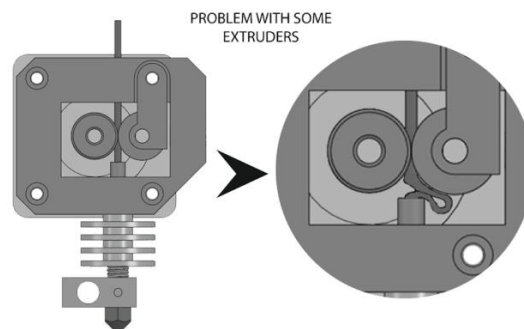
A próbanyomtatások során számos probléma merült fel. A nyomtatási paraméterek változtatásával nem sikerült megfelelő eredményt elérni. Minden esetben lyukacsos szerkezetű próbatesteket kaptunk. Ez a 3. ábrán látható.



3. ábra: A nem megfelelő, lyukacsos szerkezetű réteg kialakulása a nyomtatás során

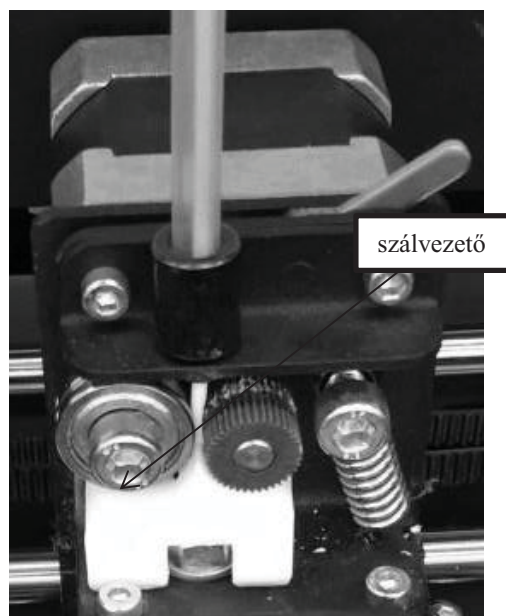
A hiba eredete nem a nyomtatási beállítások hibája, hanem a gépben keresendő. A nyomtató extrúdere nem volt képes elegendő mennyiségű anyagot a fűvókába juttatni, így minden esetben lyukacsos szerkezetet kaptunk. A hiba okának számos tényezőjét sikerült

felkutatni. Egyik ok, hogy a behúzó rendszer és a melegítő fej között hézag található, így a szálanyag képes kihajolni, ezáltal nem jut elegendő mennyiségű anyag a fűvókába.



4. ábra: Az anyag kihajlása az extrúderben [6]

Ennek elkerülése érdekében plusz alkatrészt kellett a nyomtatóra szerelni (5. ábra), ami meggátolja a huzal kihajlását.



5. ábra: CraftBot2 3D nyomtató extrúdere, valamint a nyomtatóhoz tervezett szálvezető

A nyomtatási problémák másik oka, hogy az alapanyag a rugalmasságából adódóan képes megnyúlni. A huzalt dobra tekercselt formában helyezük fel a nyomtatóra, így biztosítva a megfelelő anyagmennyiséget. Azonban ez az elrendezés a megnövekedett súrlódását okozta. Ennek elkerülése érdekében a huzalt lecsévéltük a dobról és a szükséges hosszt kiszámítva csak az adott mennyiséget helyeztük fel a nyomtatóra. Az 5. ábrán látható alkatrész képes megvezetni a huzalt, ezáltal nagyban elősegítette a nyomtatás optimális feltételeinek meghatározását. Ezek után az ideális nyomtatási paraméterekkel már sikerült megfelelő minőségű próbatesteket nyomtatni.

2.3. Nyomatási paraméterek

Nyomatás közben több beállítási paraméterrel is próbálkoztunk. Az általunk optimálisnak bizonyult főbb nyomatási adatok a következők:

- Hőmérséklet: 215 °C
- Nyomatási sebesség: 10 mm/s
- Rétegvastagság: 0,2 mm

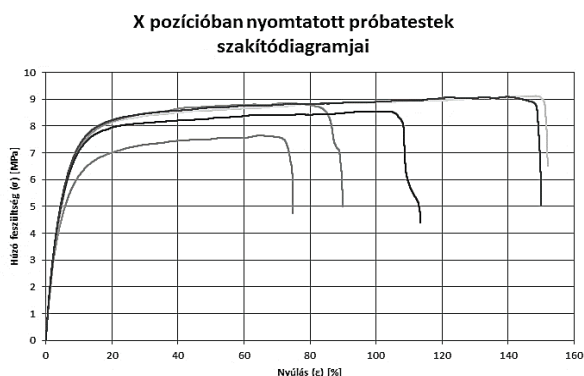
3. SOFT PLA ANYAGVIZSGÁLAT EREDMÉNYEI

Esetünkben 3D nyomtatott próbatesteket mérünk. Szabványos eljárás még nincs a 3D nyomtatott darabok vizsgálatára. Az additív gyártástechnológiával előállított polimereknek az anyagjellemzői eltérnek a hagyományos elven előállított polimerektől. Szabvány nem fedli le ezeknek az anyagoknak a mérését, ezért mérése ugyanúgy zajlik, mint a hagyományos polimerek esetében. A mérés során az MSZ EN ISO 527:2012 szabványt és az ISO 604-es szabványt alapul véve végeztük el a húzó- és a nyomóvizsgálatokat. [5]

3.1. Húzóvizsgálat

A z irányú húzó próbatesteket nem sikerült kinyomtatni, mert az anyag túl rugalmasnak bizonyult. Vékony palástfelület nyomtatása során, ha túl nagy a magasság, akkor az anyag nem nyújt elegendő szerkezeti támaszt. Így sajnos a z pozíció nyomtatása még nem volt sikeres.

Ellenben x és y pozícióban megfelelő próbatesteket kaptunk a nyomtatás során. Ezeknek a próbatesteknek a húzóvizsgálatai során kapott szakítódigrammok láthatók a következő ábrákon. (6. és 7. ábra) A különböző pozícióban nyomtatott próbatestek szakítódigrammait megvizsgálva megállapítható, hogy azok jellegre azonosak, továbbá a szakítószilárdságok között sem látható szignifikáns mértékű különbség. Ugyanakkor a rugalmassági modulusok tekintetében már jelentős mértékű különbség tapasztalható.



6. ábra: X pozícióban nyomtatott próbatestek szakítódigrammjai



7. ábra: Y pozícióban nyomtatott próbatestek szakítódigrammjai

A mérési eredményekből meghatároztuk a vizsgált darabok húzó rugalmassági modulusát, a szakítószilárdságát és a szakadási nyúlását. Ez az 1. táblázatban tekinthető meg.

1. táblázat: Mindkét nyomatási pozícióban vizsgált eredmények átlag értékei

	E [MPa]	Rm [MPa]	εszak [%]
x értékek	180,044±5,5	8,619±1,01	114,5021±41,1
y értékek	155,78±31,1	8,62104±0,38	129,2554±38,3

A két pozícióban nyomtatott próbatesteken mért átlagértékekből kiolvashatjuk, hogy milyen eltéréseket mutatnak a nyomatási pozíciók. Látható, hogy az y irányban lévő nyomtatás Young-modulusainak az eredményei nagyobb szórást produkáltak, mint az x irányban nyomtatott esetében, ellenben észrevehető az is, hogy valamelyest kisebb értékek adódtak. Ez az eltérés látható a szakadási nyúlások esetében is. A szakadási szilárdság értékek közel ugyanolyan eredményt adtak mindkét esetben.

Az y pozícióban nyomtatott próbatestek szakítódigrammjai (7. ábra) jellegre megegyeznek az x pozíciókéval (6. ábra), ami arra enged következtetni, hogy a két nyomatási pozíció között nincsenek számottevő eltérések a rugalmassági modulus tekintetében. Azonban a számszerű eredmények eltérő eredményt adtak.

Fontos megjegyezni, hogy az y pozícióban a modulusok tekintetében igen jelentős eltérések adódtak. Ez azt jelenti, hogy az eredmények reprodukálhatósága nem biztosított. Ez a gyártási paraméterek megfelelését is megkérdőjelezi.

Az y pozícióban nyomtatott próbatestek esetében probléma adódott a darabok felszedésével is, így enyhén deformálódtak. Ezt szemlélteti a 8. ábra.



8. ábra: Az y pozícióban nyomtatott húzó próbatest felszedése utáni maradó deformáció

Feltehetően ez is befolyásolta a próbatetek húzó rugalmassági modulusok eltéréseit x és y irányban nyomtatott próbatetek esetében.

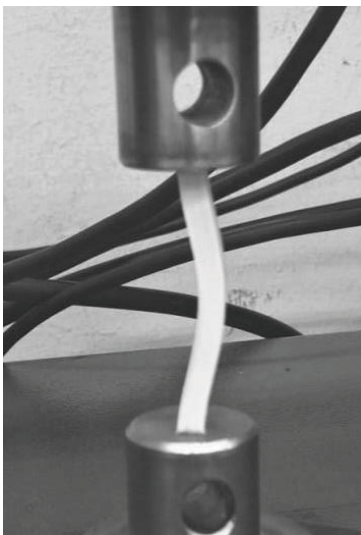
A szakadási nyúlások az átlag értéktől igen nagy eltéréseket mutatnak, mind pozitív, mind negatív irányban. Ez feltételezhetően amiatt lehet, hogy a nyomtatás során nem minden esetben lett egyenletes a rétegek összetapadása, így hézagok keletkeztek a rétegek között.

Viszont ez már a mérnöki tervezés tartományán kívül esik, így nem okoz problémát.

3.2. Nyomóvizsgálat

3.2.1. Nyomó rugalmassági modulus

A nyomó rugalmassági modulus mérése során a próbatest alakjából adódóan kihajlik, ez a 9. ábrán megfigyelhető. Ezért ez a próbatest a nyomószilárdság meghatározására nem alkalmas.



9. ábra: A nyomóerő hatására a próbatest kihajlik

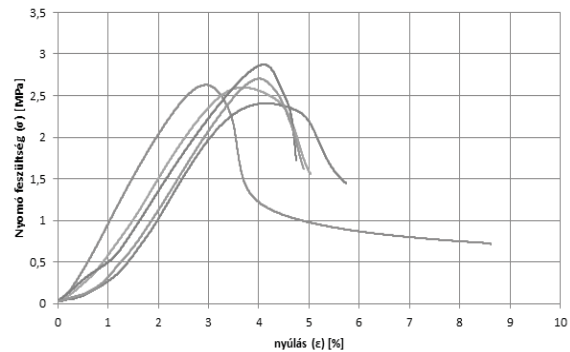
A mérés során az alábbi diagramok rajzolódtak ki (11. és 12. ábra).

Ebben az esetben is 2 különböző pozícióban nyomtatott próbateteket vizsgáltunk (10. ábra).



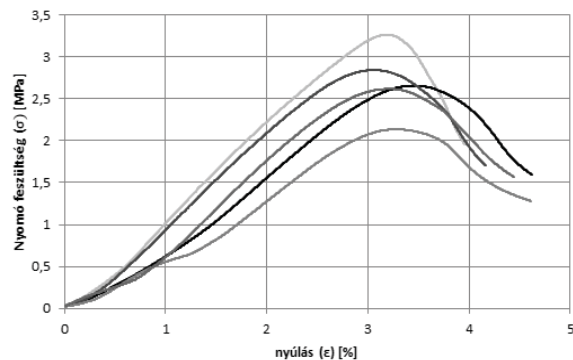
10. ábra: A nyomó rugalmassági modulus meghatározásához alkalmazott próbatetek nyomtatási pozíciói

x pozícióban nyomtatott próbatetek nyomás diagramjai



11. ábra: X pozícióban nyomtatott próbatetek nyomás hatására kialakult diagramjai a nyomó rugalmassági modulus meghatározásához

y pozícióban nyomtatott próbatetek nyomás diagramjai



12. ábra: Y pozícióban nyomtatott próbatetek nyomás hatására kialakult diagramjai a nyomó rugalmassági modulus meghatározásához

A rugalmassági modulus a görbe két pontjához húzott legnagyobb meredekségű egyenesével határozzuk meg. Ezeket az értékeket meghatározva megkapjuk a próbatetek nyomó rugalmassági modulusait, melyek átlag értékei a 2. táblázatban olvashatók.

Nyomó próbatetek esetében fontos, hogy a befogó pofákkal érintkező felületek síkok legyenek. A nyomó próbatetek esetében fontosak az alak- és helyzettűrések megfelelőisége. Esetünkben a befogási felületek nem lettek teljesen sík felületek, így ezek befolyásolhatták a vizsgálat eredményeit, ezért a kezdeti szakaszokat nem vettük figyelembe az értékek meghatározásánál.

2. táblázat: A rugalmassági modulusok átlagértékei

	E [MPa]
x érték	99,7874±2,97
y érték	112,1403±17,84

A két pozíció átlagértékeit összehasonlítva, az y pozícióban nyomtatott próbatestek esetében vett átlagérték nagyobbra adódott, mint az x esetében, de így is jóval alatta maradt a szakítódigrammoknál kiértékelt eredményekhez képest.

A nyomó rugalmassági modulusok diagramjai (11. és 12. ábra) a kezdeti szakaszban hasonló meredekséget mutatnak. Azonban a maximális nyomó modulus értékei már jelentősen eltérnek egymástól. Míg x irányban az átlag értékek 99,7874 MPa-t adtak, addig y irányban ez 112,1403 MPa volt. Az átlagtól való eltérések is különböztek, x irányban 2,97 MPa, y irányban 17,84MPa. Ezekből megállapítható, hogy az y pozícióban nyomtatott nyomó próbatestek szórásai lényegesen nagyobbak.

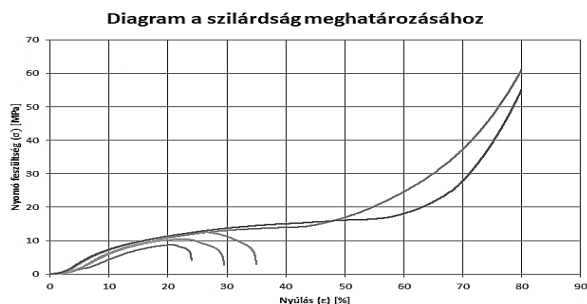
Ez feltételezhetően a gyártási paraméterek nem megfeleltetésére utal.

Az is megállapítható, hogy a nyomó rugalmassági modulusok értékei jóval elmaradnak a húzó rugalmassági modulusokhoz képest.

3.2.2. Szilárdság meghatározása

A szilárdság meghatározásához a 2. ábrán látható kisebb, merevebb, kihajlásra nem, vagy kevésbé érzékeny próbatesteket használtuk.

A nyomószilárdság meghatározásához felvett diagramok a 13. ábrán láthatók.

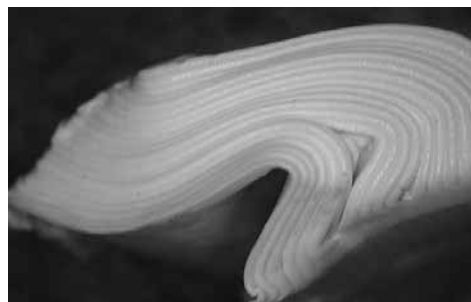


13. ábra: Szilárdság meghatározáshoz mért értékek

A görbék nagy eltéréseket mutatnak, ez a próbatestek nyomóvizsgálatából is meghatározható. Itt az eltérő görbék kiértékelésénél más-más módszer alkalmazása szükséges. Három esetben meg kell keresni a diagramok maximális értékét (nyomószilárdságát), míg a másik két esetben az inflexiós pont meghatározása szükséges.

A szilárdságnál kapott diagramok (13. ábra) igen eltérő képet mutatnak. Ennek következtében az értékek közti különbségek és a szórásuk is jelentős mértékű.

A diagramokon is látható, hogy a maximális szilárdsági határ elérése után is folytattuk a vizsgálatot, egészen addig, amíg egyes esetekben a próbatestek meg nem gyűrődtek és el nem kezdtek delaminálódni. A delaminálódás oka, hogy a próbatest rétegekből épül fel, így a nem megfelelő tapadás következtében a próbatest rétegenként szétválhat, ezt mutatja a 14. ábra.



14. ábra: Delaminálódott próbatest

4. ÖSSZEGLÉZÉS

A mérésről elmondható, hogy mind húzó-, mind nyomóvizsgálatok során az y-irányban nyomtatott próbatesteknél a szórások lényegesen nagyobbak voltak. Ez feltételezhetően a gyártási paraméterek nem megfeleltetésére utal, ezért célszerű lenne az y irányú próbatestek vizsgálatát megismételni.

Az is tapasztalható, hogy mindkét irányban a nyomó rugalmassági modulus értékek lényegesen kisebb eredményeket adtak, mint a húzó rugalmassági modulusoknál. Ez arra utalhat, hogy az anyag jelentős mértékben porózus, így a tömítésként történő alkalmazása megkérdőjelezhető.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A projekt a Nemzeti Kutatási és Innovációs Hivatal támogatásával az NKIH Alapból valósul meg, a projekt címe: Egyénre szabott orvos-biológiai implantátumok és segédeszközök új generációs gyártási folyamatának kidolgozása additív technológiákra; a pályázat azonosító száma: NVKP_16-1-2016-0022.

6. IRODALOM

- [1] <https://3dee.hu/> (2017.11.22.)
- [2] Takács János: Korszerű technológiák a felületi tulajdonságok alakításában, Műegyetem Kiadó, Budapest, ISBN 963-420-789-8, 2004
- [3] Composites Part B: 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective Xin Wang, Man Jiang, Zuowan Zhou, Jihua Gou, David Hui, 2016
- [4] Ficzere P, Szabó G, Lovas L, Borbás L, SLS eljárással elérhető anyagjellemzők egyénre szabott orvosi implantátumok méretezéséhez, GÉP LXVIII:(3) pp. 62-65. (2017)
- [5] Szakács Hajnalka, Varga Csilla, Nagy Roland: Polimerek mérés technikája a Pannon Egyetemen a TÁMOP-4.1.2/A/2-10/1-2010-0012 projekt keretében az Európai Szociális Alap támogatásával készült, 2012
- [6] <http://www.freedee.hu/hogyan-nyomtassunk-rugalmas-filamenttel/> (2017.11.22.)

Korszerű amorf üvegfém szalagok vágás technológiájának vizsgálata klasszikus metallográfiai- és egyedi mágneses mérések segítségével

Investigating the effects of cutting parameters of amorphous magnetic materials by classic metallographic and individual magnetic measurements

KOCSIS B.^{a,*}, KÓTI D.^b ÉS KOVÁCS G.^a

^aSzéchenyi István Egyetem, Anyagtudományi és Technológiai Tanszék, 9026 Magyarország Győr Egyetem tér 1.

^bDunaújvárosi Egyetem, Gépészeti Tanszék, 2401 Magyarország Dunaújváros Táncsics Mihály utca 1.

Present study includes the development of shaped cutting technology of extremely thin amorphous magnetic materials. The results of classical metallographic measurements and individual magnetic measurements were based on the classification of cuts. The magnetic examinations were made on a measuring equipment which was developed for this purpose so that we could compare different technologies based on relevant values for end use. The main aim of our research is to develop an electric motor wherein a modern amorphous soft magnet forms the stator in a laminate design, as opposed to the previously rolled solutions. Our expectation is that due to the appropriate material selection, optimized geometry and laminate design, we get a more efficient, smaller volume electric motor than those currently available on the market.

1. Bevezetés

Napjainkban egyre nagyobb hangsúlyt fektetünk elektromos berendezéseink teljesítményének és hatékonyságának növelésére. Ennek egyik meghatározó fejlesztési irányvonala a korszerű lágymágneses anyagok használata a nagyteljesítményű elektromos berendezésekben [1]. Lágymágneses anyagoknak a kis koercivitással (jellemzően $H_c < 100$ [A/m]) rendelkező anyagokat tekintjük. Az amorf szerkezetű lágymágneses anyagok előnye, hogy kis koercivitásuk mellett vékony (0,025 mm) kialakításuknak köszönhetően kicsi a vasvesztésük, mindamelllett, hogy gyártási költségük alacsony [2]. A hagyományosan alkalmazott melegen vagy hidegen hengerlés helyett, úgynevezett gyorsított eljárással állítják elő. Ennek lényege, hogy az olvadt állapotban lévő ötvözetet egy belülről hűtött gyorsan forgó kerékre csepegtetik úgy, hogy a hűtés sebessége elérje a minimum 1000 °C/s-os értéket. Ennek következtében az anyagnak nincs ideje kikristályosodni, így a vasmolekulák amorf szerkezetben befagynak [3].

Számos kutatás foglalkozik az új állórész geometriák fejlesztésével, amely ezen vékony és rideg anyagok alakos vágási lehetőségeinek vizsgálatát vetíti előre. Jelenleg az iparban alkalmazott állórészeket tekercselés útján állítják elő, ahol ezeket a szalagokat hasítás révén hozzák a kívánt szélességre. Alakos vágásokhoz a legtöbb gyártó a vízsugaras vágást említi, mivel ebben az esetben hőhatás nélkül tudjuk megmunkálni az anyagot, így az megőrzi amorf szerkezetét [4]. Jelen tanulmányban egy összehasonlító vizsgálatsorozatot mutatunk be, a lézersugaras és vízsugaras vágások okozta hatásokról fémüveg szalagokon. A megmunkált alapanyag minden esetben a Metglas® 2605SA1 típusú Fe-Si-B alapú amorf lágymágnes volt.

2. Eljárás

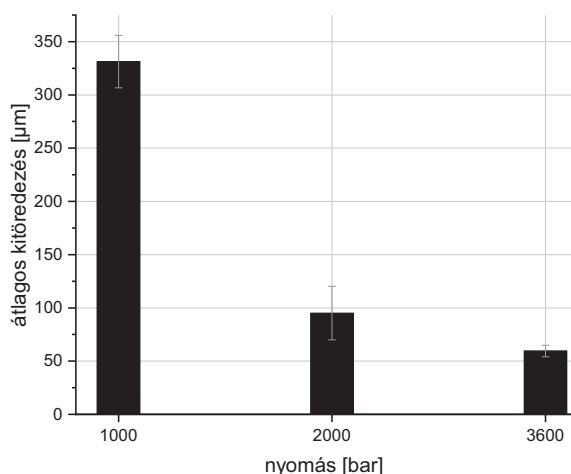
Előzetes szimulációk útján meghatározott állórész geometria megköveteli a pontos, CNC vezérelt alakos vágást.

Első technológia, amelyet vizsgáltunk az abrazív vízsugaras vágás volt. A próbavágások során egy Flow IFB2 típusú kétdimenziós vágásokra alkalmas vízsugaras berendezést használtunk.

Jelen esetben a vágott él minőségét a következő paraméterek befolyásolhatták: alkatrész megfelelő lefogatása, keverőcső hossza, kilépő vízsugár átmérője, fúvóka átmérője, vágófej távolsága a munkadarabtól, víz nyomása, abrazív homok tömegárama, előtolási sebesség, megfelelő vákuum, lyukasztás módja, valamint az abrazív homokszemcsék mérete. A fémüveg szalag lefogatására több módszert kipróbáltunk. PVC, valamint acél lemezek közé fogatva is végeztünk vágásokat, a tapasztalat az volt, hogy a PVC lemezek közé helyezett darabok vágott élei szebbek voltak. Próbálkoztunk vegyes felfogatásban is (alul acél, felül PVC és fordítva), de a PVC lefogatás bizonyult a legjobbnak. A keverőcső hosszának változtatása nem állt módunkban, minden esetben 76,2 mm hosszú keverőszárat alkalmaztunk. A kilépő vízsugár átmérőjét két különböző keverőcső segítségével 1,016 mm-re és 1,34 mm-re tudtuk beállítani. Az ekkora mértékű változtatás szignifikáns változást nem mutatott I réteg fémüveg szalag vágása során. A vágófej és munkadarab távolságának állítása manuálisan történt. Az összes vágási kísérlet során a gyártói ajánlásnak megfelelő kb. 2,5 mm-es beállítást alkalmaztuk. A szivattyúban felépülő és a vágás során optimálisnak bizonyult víznyomást a teljes tartományban 689,5 - 3861,1 bar között interpolációs

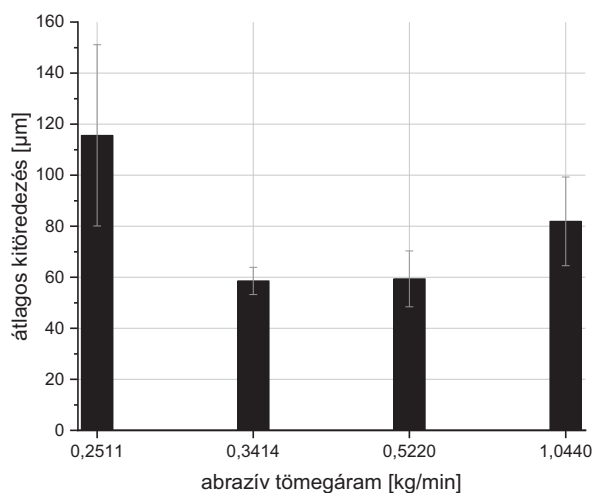
*Felelős szerző e-mail címe: kocsis.bence@sze.hu

közelítés útján határoztuk meg. A nyomás vágott él minőségére gyakorolt hatását optikai mikroszkópos mérésekkel ellenőriztük, melyet az 1. ábra szemléltet.

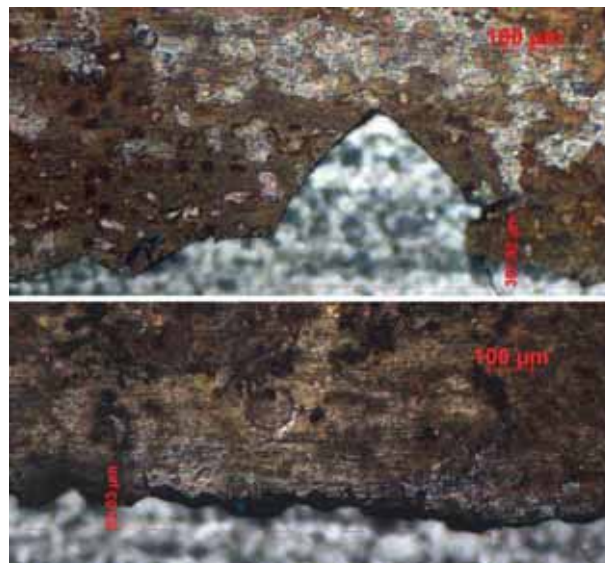


1. ábra Víz sugar nyomásváltozásának hatása a vágott él egyenetlenségére.

Az abrazív közeg tömegáramának hatásánál két dolgot kellett mérlegelni. Egy bizonyos mértékig növelve a tömegáramot egyenletesebb, határozottabb vágott él kaptunk, azonban ezek optikai és SEM (pásztázó elektronmikroszkóp) vizsgálata során kiderült, hogy sokkal több mikrorepedést, hibát tartalmaznak, mint a durván töredezett élű, kevesebb abrazívval vagy esetleg abrazív anyag nélkül vágott mintadarabok.

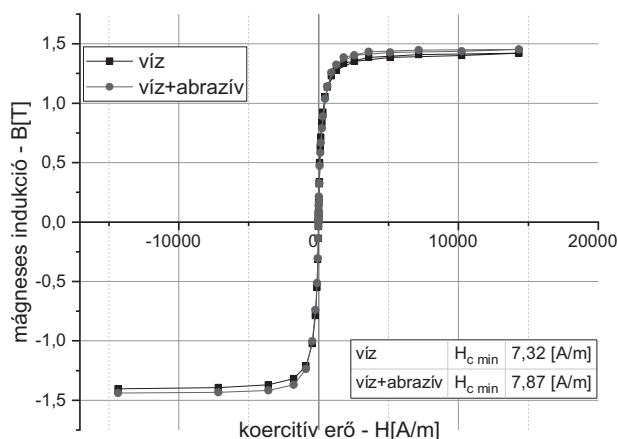


2. ábra Abrazív szemcsék tömegáramának hatása a vágott él egyenetlenségére.



3. ábra Abrazív nélkül (felső) és abrazívval (alsó) vágott üvegfém szalagok jellemző élszakaszainak optikai mikroszkópos felvételei 10-szeres nagyításban.

A mikrorepedések számának növekedésével egyre több folytonossági hiány, hiba keletkezik, amelyek közvetlen környezetében a mágneses tér kilép az anyagból, ezzel a vasmag mágneses energiája csökken. A mágneses mérések alapján a tisztán vízzel vágott minta telítési indukciója kis mértékben ugyan, de nagyobb lett, ami a fenti állításokat igazolja. Ennek szemléltetésére az 4. ábra szolgál.



4. ábra Abrazív anyaggal és anélkül kivágott 100 x 20 x 0,025 mm-es fémüveg mintadarabok mágneses hiszterézis görbéi.

Továbbá problémát jelent, hogy különböző feszültségállapotok jellemzik az anyagot, amelyek rontják az élettartamra vonatkozó tulajdonságait különösen, ha hőkezelésnek is alá akarjuk vetni. Következésképpen tehát a kevesebb abrazívval, gazdaságosabb úton előállított minták mágneses és élettartamra vonatkozó tulajdonságai is jobbak lettek annak ellenére, hogy nagyobb a vágott él egyenetlensége.



5. ábra Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel egy jellemző mikrorepedési képről, amorf fémüveg szalag vízszintes vágását követően.

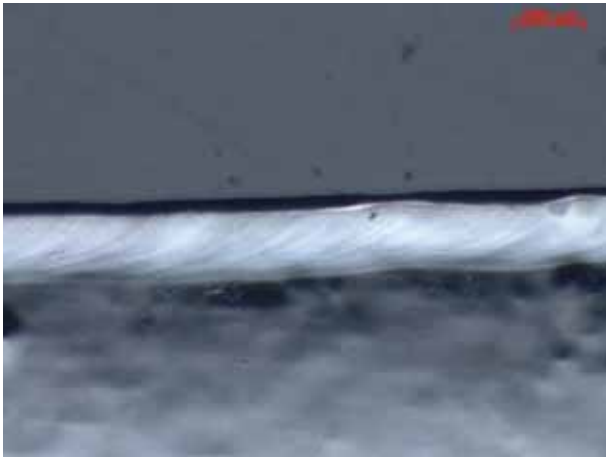
A következő vágási minőséget befolyásoló tényező az előtolási sebesség. Ennek a vizsgálatának az eredménye az előző bekezdésben leírtakból logikusan következik. Minél nagyobb előtolási sebességet alkalmaztunk, fajlagosan annál kevesebb abrazív szemcse jutott egy 1 mm-es szakasz kivágásához. Így tehát kevésbé roncsoltuk, stresszeltük az anyagot, csökkent a vágott él mentén a berepedeztettség. Ez szebb vágott élt és jobb mágneses tulajdonságokat eredményezett, mint a kisebb előtolási sebességgel készült darabok esetében. Abrazív homokszemcsék nélkül átlag 350-500 mm/min-es, abrazív anyag hozzáadásával akár 850-1000 mm/min-es előtolási sebességet is tudunk alkalmazni. Vágás során az úgynevezett "corner control" funkció be volt kapcsolva, amely a kontúr mentén az éles élváltások közvetlen közelében lelassított a vágófej előtolási sebességét. A vákuum megválasztásánál mindig az adott gyártói paraméterlistában meghatározott értéket alkalmaztuk. Ennek változtatása a próbavágások során nem mutatott jelentősebb hatást a vágott él minőségére. A lyukasztás módja is befolyásolhatja annak közvetlen közelében a vágott él minőségét. Ezt mi is tapasztaltuk, ugyanis a beszúrás helyén mindig rosszabb minőségű volt a vágott él. Minden esetben kontúron kívüli, álló helyzetű, nagynyomású lineáris lyukasztást alkalmaztunk. Az abrazív szemcsék méretének megfelelő megválasztásával lehet még tovább finomítani a vágás minőségét, azonban a kereskedelemben a vizsgálatok elvégzésekor csak egyféle szemcseméretű homok volt megtalálható. Az alkalmazott anyag egy ausztrál vöröshomok volt, melynek átlagos szemcsemérete 0,15-0,3 mm. Jelen esetben nincs relevanciája a sugárelhajlás és a vágott él kúposági vizsgálatának, mivel egy réteg vágásánál ez elhanyagolható, azonban a későbbi, többrétegű vágási vizsgálatoknál érdemes lesz ezeket is megvizsgálni.

A második technológia, amelyet a vágási kísérletek során kipróbáltunk, a lézeres anyagmegmunkálás volt. A lézersugár az anyagmegmunkálás egyik új és univerzális szerszámává

vált, ami a sokrétű felhasználásának köszönhető. A technológia lényege, hogy egy ún. aktív anyagot gerjesztve abból fotonok lépnek ki, amelyeket fókuszálva egy igen nagy teljesítménysűrűség érhető el. A lézersugár az anyag felületével találkozáskor annak fajtájától és tulajdonságaitól függően elnyelődik, visszaverődik vagy átterszódik. Esetünkben az anyag a sugárzás nagyrészt elnyeli, melynek következtében felhevül. A felület hőmérséklete meghaladhatja az anyag párolgási hőmérsékletét is. A lézersugárral koaxiálisan vezetett gázsugár segít eltávolítani a megolvadt, elpárolgott anyagot a vágási résből. Mindezek alkalmassá teszik ezt a technológiát arra, hogy különféle anyagokat hevítsen fel, olvasson meg, párologtasson el vagy plazma állapotba hozzon és e hatások eredményeként, anyagokat hőkezeljünk, feliratozzunk, hegesszünk vagy vágjunk vele. A lézersugár nagy energiasűrűsége és jó fókuszálhatósága révén térben és időben nagyon jól behatárolható energiabevitelt tesz lehetővé, ami a hagyományos eljárásokhoz viszonyítva jelentősen kisebb feszültségeket okoz, továbbá jó automatizáltsági foka révén pontos anyagmegmunkálásokat tudunk létrehozni. A lézeres vágási kísérletek során egy Oerlikon OPL 2000 típusú CO₂ lézert használtunk, folyamatos sugárzási üzemmódban, ahol a lézer teljesítménye 50 W volt. A vágást követően hagytuk a darabokat a szabad levegőn lehűlni. A kísérlet során 100 x 10 mm-es darabokat vágunk gyártási irányra merőlegesen és azzal megegyezően is.

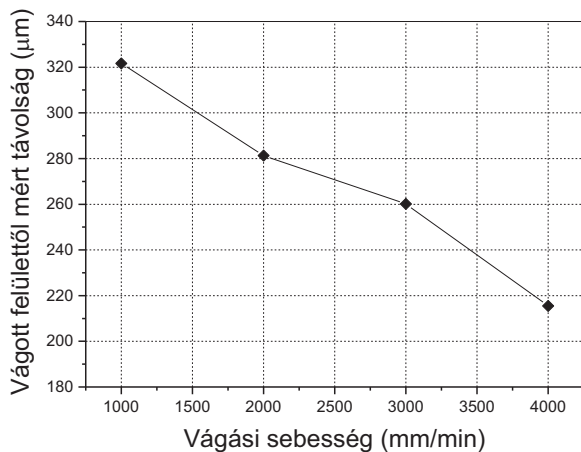
A vágott él minőségét a következő paraméterek befolyásolják: lézersugár fókuszálásának mértéke, amely szoftveresen állítható, vágási sebesség, lézerteljesítmény, védőgáz fajtája, s annak térfogatárama, fűvóka átmérője (kilépő lézersugár átmérőjét befolyásolja) és annak távolsága a munkadarabtól. A lézeres vágások esetében a vágott él minősítésére a szalag éle mentén kialakult hőhatásövezet szolgál információs értékkel. Ennek vizsgálatát mikrokeménység mérésével és metallográfiai eljárásokkal végeztük. A hőhatásövezetben az anyag az eljárás során felhevül, megolvad és az amorf szerkezetbe fagyott vas és szilícium molekulák újra képessé válnak, hogy felvegyenek egy rendezett, kristályos szerkezetet. Ezen kristályos szerkezet kialakulásával lokálisan romlanak az üvegfém szalag mágneses tulajdonságai. Következésképpen, minél kisebb hőhatásövezet alakul ki a vágás során, a végfelhasználás szempontjából annál jobb minőségű mintadarabot kapunk.

A lézersugár fókuszálásának vizsgálata jelenleg is folyik. Ebben a tanulmányban taglalt vizsgálatok során a fókuszpont az üvegfém lemez felszínére volt beállítva. Vélhetően, ha a lemez síkja alá fókuszálunk a lézerral, akkor csökkenthető a vágott élnél a lokális energiabevitel, nagyobb felületen oszlik el a lézersugár teljesítménye, vagyis csökkenhet a hőhatásövezet szélessége. A vágási sebességet a gép korlátainak megfelelően 1000 - 4000 mm/min között változtattuk. A szakirodalom szerint, minél nagyobb vágási sebességet alkalmazunk, annál kisebb lesz a fajlagos hőbevitel és ezáltal a hőhatásövezet szélessége is. Ennek helytállóságát a kísérletek során méréseink is alátámasztják.



6.ábra CO₂ lézeres vágás mikroszkópos felvétele. Vágási sebesség 4000 mm/min, védőgáz típusa argon, áramlási sebessége 30 l/min.

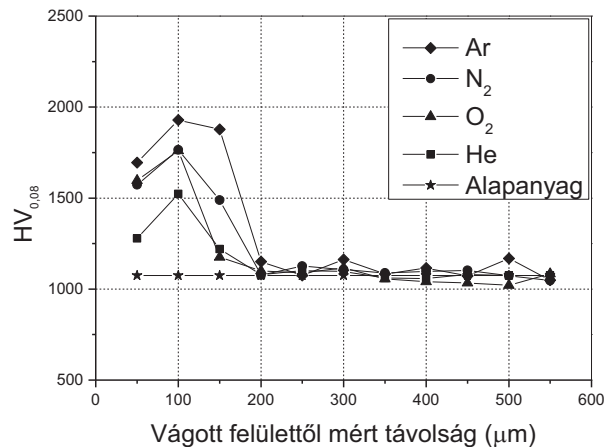
A vágások során a lézer kimeneti teljesítménye konstans 50 W volt, a védőgáz Ar volt, melynek egy állandó gázáramlási sebességet állítottunk be. Az eredmények azt mutatják, hogy a vágási sebesség növelése drasztikus mértékben csökkenti a hőérzékeny terület szélességét. Ezt szemlélteti a 7. ábra.



7.ábra CO₂ lézeres vágási sebesség hatásának vizsgálata a hőhatásövezet szélességére. Az alkalmazott védőgáz típusa argon, áramlási sebessége 30 l/min.

A lézer teljesítményét 6000 - 50 W között tudtuk állítani. A korábban leírtak alapján itt is igaz, hogy minél kisebb a lokális energiabevitel a vágás környezetében, annál kisebb lesz a hőhatásövezet és a leolvadási sorja is. A rendelkezésünkre álló berendezés minimális lézerteljesítményét alkalmazva kaptuk a legjobb minőségű mintadarabokat. A jövőben egy precíziós berendezésen elvégezzük a még kisebb lézerteljesítményű vágásokat, valamint egy szállézeres gépen vizsgáljuk az impulzus üzemi vágások minőségét is. A vágások során Ar, N₂, O₂, He védőgázokat használtunk. A védőgáz típusának és áramlási sebességének hatásánál a várakozásainkkal ellentétes eredményt kaptunk a kiértékelés során. A különböző

gázatmoszférák típusának nincs jelentős hatása a hőhatásövezet szélességére, ám a mikrokeménység csúcsok nagyságára igen. A kapott eredmények azt tükrözik, hogy a védőgáz hővezetőképessége jelentős hatással van a kristályosodás mértékére, 8. ábra.

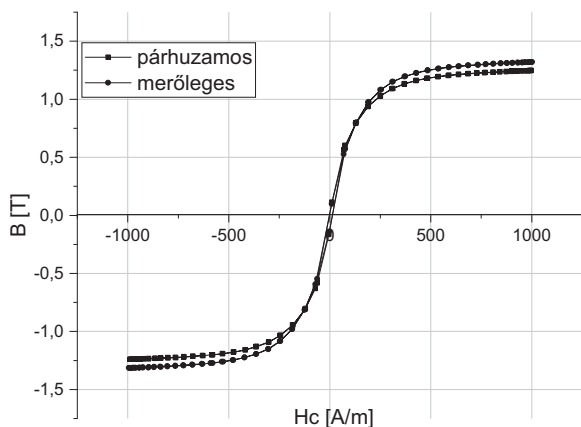


8.ábra CO₂ lézeres vágások során vizsgált védőgáz típusok hőhatásövezetre gyakorolt hatásának vizsgálata.

A gázatmoszféra különböző áramlási sebességeinek beállításánál is hasonló eredményeket kaptunk. A hőhatásövezet szélességére nem, de a keménységértékek nagyságára befolyással van az áramlási sebesség. Ennek magyarázata egyszerűen a nagyobb hőelvonó képességre vezethető vissza. A fúvóka átmérőjének a vágásra gyakorolt hatását nem állt módunkban vizsgálni. A fúvóka távolsága konstans 2 mm volt a munkadarabtól.

3. Összefoglalás

Az amorf szerkezetű lágymágnes szalagból előre definiált méretű (100 x 10 mm; 100 x 20 mm) négyzetes próbatesteket munkáltunk ki. Ezek megfelelő összehasonlítási alapul szolgáltak a különböző megmunkálási technológiákhoz. Az összehasonlítás alapjául a vágott él metallográfiai és mikrokeménység mérés eredményei szolgáltak, amelyeket később összevetve az egyes minták mért mágneses hiszterézis görbéivel, különböző korrelációkat állapítottunk meg. Mivel a kutatás részeként megtervezett elektromotor álló részének geometriája megkövetelte, vizsgáltuk a szalag mágneses tulajdonságainak irányfüggőségét is. Ahogy arra következtetni lehetett, az amorf szerkezet miatt nem mutatott anizotropikus tulajdonságokat a gyártási irányra merőlegesen, valamint azzal megegyezően kivágott mintadarabok.



9. ábra Üvegfém szalag irányfüggőségének mágneses vizsgálata.

Vízugaras vágás során készített mintadarabok optikai mikroszkópos felvételei alapján a következő összefüggéseket állapítottuk meg. A gyártói ajánlásban szereplő ~2,5 mm-es fűvóka-mintadarab távolság megfelelő, a nyomás csökkentésével romlik a vágott él minősége, nem lesz határozott vágott/ridegen tört felülete az élnek, növekszik a harmadik dimenzióban megjelenő sorja mérete. A vágások során a legoptimálisabb nyomásértéknek a 3600 bar jött ki. Tesztelt nyomástartomány 689,5 - 3861,1 bar volt. Az abrazív anyag tömegárama és a fűvóka előtolási sebessége között egyenesarányos kapcsolat van. Ha növelem a tömegáramot, növelnem kell az előtolási sebességet is. Esetünkben az átlagos 850-1000 mm/min-es előtolási sebességhez 0,3414 kg/min tömegáramú abrazív anyag bizonyult a legoptimálisabbnak. A fűvóka átmérőjének változtatásában túl nagy mozgásterünk nem volt, de a kisebb átmérőjű fej némiképp jobb élminőséget garantál. Ennek további vizsgálata indokolt. Drasztikus minőségjavulás várható továbbá az abrazív homokszemcse méretének csökkentésével is, amelyet a jövőben vizsgálni fogunk.

Az egyes mintadarabok vágás utáni mikrokeménységének vizsgálatánál azt vártuk, hogy jelentős különbséget nem tapasztalunk az éltől a mintadarab közepe felé haladva, mivel ez a technológia hőhatás nélküli eljárás, vagyis a szövetszerkezetet nem változtatja meg. Várakozásaink beigazolódtak, élmenti felkeményedés nem volt tapasztalható, minimális véletlenszerű keménységváltozás figyelhető meg, amely az amorf szövetszerkezetnek, a mikrorepedéseknek és a rendkívül vékony mintadarab miatti mérési bizonytalanságnak tudható be.

A mágneses mérések alapján elmondható, hogy a legjobb tulajdonsággal a tisztán vízzel vágott mintadarab rendelkezik, ám nem sokkal marad el tőle az általunk legoptimálisabbnak minősített technológiával vágott darab. A jövőben érdemes lesz mérlegelni költséghatékonysági szempontból, hogy ugyan a koercitív terükben ~0,5 A/m volt a különbség a tisztán vízzel vágott darab javára, de abrazív homokszemcsék hozzáadásával kétszeres előtolási sebességet tudunk alkalmazni és akár több réteg vágására is alkalmas lehet.

A CO₂ lézeres vágások kiértékelésére is ugyan azokat a vizsgálati módszereket alkalmaztuk, mint a vízugaras minták esetében. Konklúzióként megállapítható, hogy minél kisebb energiabevittel kivitelezhető a vágás, annál kisebb hőhatásövezet alakul ki a vágott él mentén. A fókuszávolság és a lézerteljesítmény változtatásával tovább csökkenthető az energiasűrűség a vágásnál, így ezek vizsgálatát a jövőben elvégezzük. A megfelelő védőgázt a hőelvonó képesség alapján érdemes megválasztani, amivel jelentősen nem csökkenthető a hőhatásövezet szélessége, de a fázisátalakulás mértéke igen. Az előtolási sebesség mértékét növelve szintén csökkenteni tudtuk a vágás során bevitt energiamentisítést, amivel viszont már drasztikus csökkenést értünk el az átalakult szövetszerkezet szélességében. A mágneses mérések alapján indokoltan találjuk a szállézeres valamint az impulzus üzemű lézeres vágások vizsgálatát is. Amennyiben tovább tudjuk csökkenteni a vágáshoz szükséges energiabevitelt, jó eséllyel megközelíthetjük vagy akár túlszárnyalhatjuk a vízugaras vágással készült minták mágneses tulajdonságait.

Köszönetnyilvánítás

Jelen dolgozat megvalósulásában segítségünkre voltak a Széchenyi István Egyetem munkatársai Dr. Zsoldos Ibolya, Dr. Csizmazia Ferencné, Dr. Kuczmann Miklós, a Dunaújvárosi Egyetemről, Dr. Szabó Attila, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemről Prof. Dr. Mészáros István és Dr. Lovas Antal, a Kassai Műszaki Egyetem munkatársa Dr. Novák László, akiknek ezúton szeretnénk megköszönni közreműködésüket. Köszönetünket fejezzük ki az EFOP-3.6.2-16-2017-00016 és az EFOP-3.6.1-16-2016-00017 Nemzetköziesítés, oktatói, kutatói és hallgatói utánpótlás megteremtése, a tudás és technológia transzfer fejlesztése, mint az intelligens szakosodás eszközei a Széchenyi István Egyetemen pályázatok támogatásáért.

Referenciák

- [1] S. Derlecki Z. Kusmierek D. Maria J. Szulakowski "Magnetic properties of amorphous materials used as corps of electric machines" *Przeglad Elektrotechniczny (Elect. Rev.)* vol. 88 no. 12a pp. 10-13 2012.
- [2] A. Krings, M. Cossale, A. Tenconi, J. Soulard, A. Cavagnino, A. Boglietti, *Magnetic Materials Used in Electrical Machines*, IEEE Industry Applications Magazine november/december 2017.
- [3] R. Hilzinger W. Rodewald *Magnetic Materials Fundamentals Products Properties Applications* Erlangen Germany:Publicis 2013.
- [4] A. Schoppa, H. Louis, F. Pude, Ch. von Rad: Influence of abrasive waterjet cutting on the magnetic properties of non-oriented electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 254–255 (2003) 370–372.

CSAVARKÖTÉS MODELLEZÉSÉNEK KÉRDÉSEI

NOTES ON BOLTED LINK MODELLING

*Dr. Lovas László egyetemi docens, lovas@kge.bme.hu
BME Járműelemek és Jármű-szerkezetanalízis Tanszék*

ABSTRACT. This paper deals with the use of bolted link in medical applications. Types of application are presented. A numerical bolted link model is described and applied for cranial implant fixation. Basic material properties are shown. Effect of bolt pretension is discussed in bone and plastic. Effect of growing skull on implant fixation bolt is discussed.

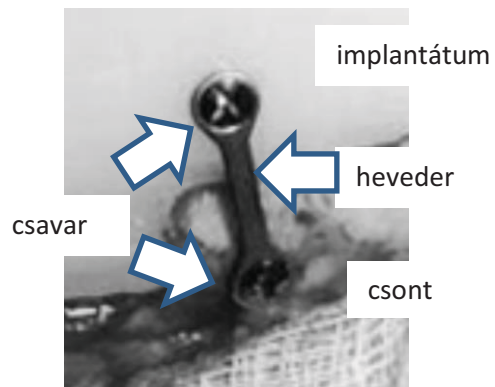
1. BEVEZETÉS

A csavarkötés a gépészetben jól bevált, a gyakorlatban széles körűen alkalmazott megoldás. Szokásos anyagoknál, izotrópnak tekinthető anyagok környezetében, időben állandó terhelés esetén könnyű méretezni, előfeszítő erőt és meghúzási nyomatékot számítani. Ha a terhelés iránya a csavar tengelyével megegyezik, akkor időben változó terhelés esetében is jól számítható a kötés. Ha azonban a terhelés a csavar tengelyére merőleges és időben ciklikusan agy véletlenszerűen változó, a csavar méretezése nehézségekbe ütközik. Ugyanígy nehéz a csavarkötés méretezése nem izotróp anyagokban, időben változó terhelés esetén. Jellemzően ilyen eset az élő testben, csontban alkalmazott csavarkötés esete.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

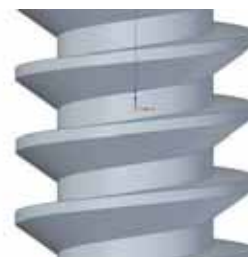
A vonatkozó szakirodalomban több téma kapcsán foglalkoznak csavar és csont kapcsolatával. Klasszikus téma a törött csontok merevítése és pozícióban tartása csavarkötéssel rögzített elemekkel [2]. Másik fontos téma az inak, ínzszalagok szakadás utáni rögzítése csavarkötéssel. Ekkor az ín végét csavarkötéssel szorítják egy furatba olyan módon, hogy az behajtogatódik a menetbe [4]. Elterjedt és vizsgált terület még a fog implantátumok csavarkötéses rögzítése a csontban. Itt érdekes probléma a terhelő erő véletlen nagysága és iránya, valamint az élő és a csavarozott fogról történő terhelésátadás különbsége [3]. Mi egy korábbi munka folytatásaként [1] további témával, a koponya implantátumok rögzítésével foglalkozunk ebben a cikkben.

A koponya implantátumok rögzítése kétféle módon történhet. Lehetséges fonállal rögzíteni, illetve csavarok és rögzítő fémhevederek segítségével (1. ábra). Mindkét esetben pontszerű, kis zónában történik az erő átadása a koponyacsont és az implantátum között. Tekintve, hogy az implantátum és a koponyacsont mechanikai terhelése minimális, a rögzítés feladata jellemzően a helyzetben tartás.



1. ábra. Implantátum rögzítése csavarkötéssel

A csavarkötés esetünkben speciális, orvosi alkalmazásra készült csavarokkal történik. A csavarok menetprofilját szabvány rögzíti [5], az a műszaki gyakorlatban használt lemezcavarokhoz hasonló alakú. A menetprofil aszimmetrikus háromszög alakú (2. ábra). Ebben a cikkben a rögzítő csavarnak és környezetének a modellezésével foglalkozunk.

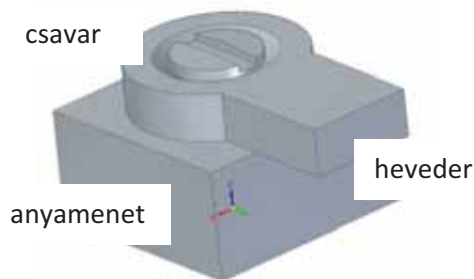


2. ábra. Menetprofil

3. A CSAVARKÖTÉS MODELL LEÍRÁSA.

A koponya implantátumokhoz szokásosan alkalmazott, HA 2 szabványos profilú, 2 mm névle-

ges menetátmérőjű csavart teljes egészében modelleztük. A menetet tartalmazó anyagot, legyen az a koponya csont vagy az implantátum, a csavar közvetlen környezetében kivágott, 10x10x5mm méretű kis hasábbal közelítettük. A rögzítő hevedernek a felét modelleztük (3. ábra).



3. ábra. A vizsgált csavarkötés modellje

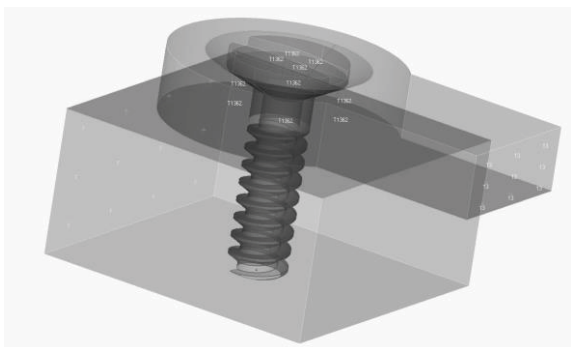
A csavar és a heveder anyaga az orvosi gyakorlatban szokásos Ti6Al4V. Az implantátum anyaga Chirulen 1020 kereskedelmi elnevezésű UHMW-PE műanyag. A koponyacsont anyagának a vékony, lapos csontokra jellemzően kemény, kéreg (corticalis) csont anyagot választunk. Ez a koponyacsont bizonyos részeire megfelelő pontosságú közelítés. Az anyagjellemzőket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Anyagjellemzők

Anyag	Young modulus	Poisson szám
Ti6Al4V	115 000 MPa	0,34
Chirulen 1020	500 MPa	0,46
csont kéreg	17 000 MPa	0,25

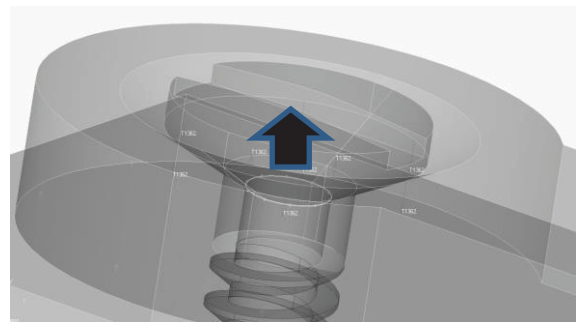
3. A MODELL FELÉPÍTÉSE

A vizsgált csavarkötés elemeinek modelljét CAD tervezőrendszerben hoztuk létre, majd összeillesztettük. Ütközés vizsgálattal ellenőriztük, megfelelőek-e a komplementer geometriák. Ezek után végeselemes programban definiáltuk a kontakt zónákat (4. ábra) és a súrlódási viszonyokat.

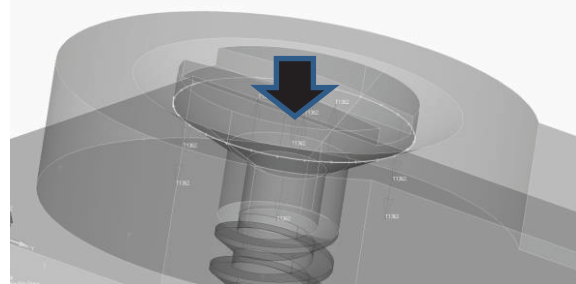


4. ábra. Kontakt zónák a modellben

Ismert, hogy a csavar terhelés átadásának modellezése nem egyszerű. Az előfeszítő erő modellezését több véges elemes szoftver különböző képpen kezeli. A csavar szára alapesetben húzott, az előfeszítő erő ki akarja húzni az anyamenetből. A csavar feje ugyanakkor rányomódik az összefogott anyagra. Ezt úgy modelleztük, hogy a csavar feje alatt a szár átmérőn felfele húztuk a csavart, míg a fej külső átmérőjén ugyanolyan nagyságú nyomóerőt tettünk a csavarra (5. ábra). Más szoftverek (pl. Abaqus) hasonló elvű modellel dolgoznak.



a) húzás a süllyesztés kis átmérőjén



b) nyomás a süllyesztés nagy átmérőjén

5. ábra. Csavar előfeszítés modellezése

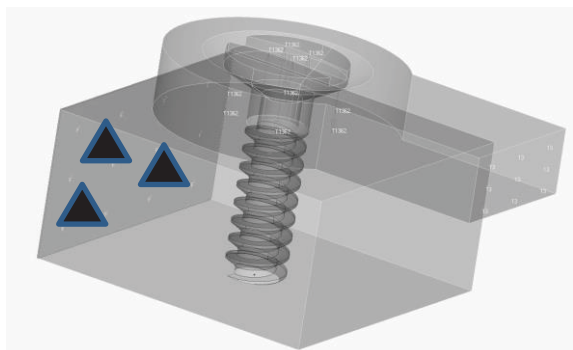
A csavarok meghúzása esetünkben alapvetően kézzel történik. A meghúzási nyomatékból az előfeszítő erő az alábbi képlettel számítható:

$$F_{ef} = \frac{M}{\frac{d_1}{2} \cdot \tan(\alpha + \rho') + \frac{d_f}{2} \cdot \mu_f} \quad (1)$$

Az egyenletben a súrlódás két szinten van jelen. Az első szint a menet súrlódása a csontban, amelyet a ρ' súrlódási félkúpszög jellemez. A második szint a csavar feje alatti súrlódás a csavar és a heveder között jelenik meg, ezt a μ_f súrlódási tényező jellemezi. Az irodalom alapján a meghúzási nyomaték értéke 1-2 Nm, a csont és csavar közötti súrlódási tényező pedig 0,08 és 0,3 között szór [2]. Közelítő értéként 1 Nm meghúzási nyomatéket és 0,1 csavarmeneti súrlódási tényezőt vettünk fel. 1 Nm nyomaték esetén az

előfeszítő erő értéke 454 N, 2 és 3 Nm esetén ennek arányos többszöröse.

A modell a heveder szárával ellentétes irányban, az anyamenetet tartalmazó hasáb oldalán van megfogva (6. ábra).



6. ábra. A modell megfogása

4. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

Elsőnek tekintjük a terheléseket statikus esetben. Ekkor a heveder-anyamenet rendszert csak a csavar meghúzásából származó előfeszítő erő terheli. A meghúzási nyomaték rendre 1, 2 és 3 Nm volt. Tekintve, hogy a csavar és a heveder titán anyaga sokkal merevebb az anyáénál, kizárólag az anyamenet környezetében ébredő kontakt feszültségek és egyenértékű feszültségek csúcserkéit vizsgáltuk. A szimulációt kéregi csont anyagra és Chirulen implantátum anyagra végeztük el. Az eredményeket a 2. táblázat és a 3. táblázat tartalmazza.

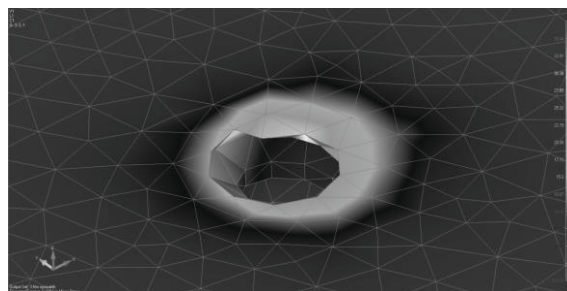
2. táblázat. Feszültség értékek kéregi csontban

Meghúzási nyomaték [Nm]	Hertz feszültség max. [MPa]	Egyenértékű feszültség max. [MPa]
1	123	62
2	232	123
3	338	174

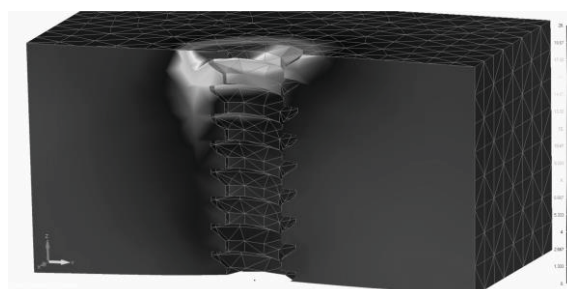
3. táblázat. Feszültség értékek Chirulen anyagban

Meghúzási nyomaték [Nm]	Hertz feszültség max. [MPa]	Egyenértékű feszültség max. [MPa]
1	62	13
2	104	25
3	152	38

A feszültségek legnagyobb értéke rendre az anyamenet felső végén ébredt (7. ábra). A menet környezet átlagos feszültség értékét az egyenértékű feszültség maximum jól követi (8. ábra).



7. ábra. Feszültség csúcs az anyamenet végén



8. ábra. Feszültség csúcs az anyameneten, elmozdulás terhelés esetén

Növekedő koponya esetén a heveder két végpontja között változik a távolság. Korábbi kutatásaink alapján a növekedés mértéke koponya kerületnél mérve közelítőleg évente 1% [1]. Az orvosi gyakorlat alapján egy gyermek implantátum szokásos mérete közelítőleg 60 mm a kerület mentén. A növekedés ennek 1%-a, évi 0,6 mm hosszváltozás lehet. Ezt úgy modelleztük, hogy a heveder végét ezzel az értékkel elmozdítottuk. Mechanikai szempontból ez a terhelés külpontos húzásnak felel meg. A szimuláció eredményeit a 4. táblázat és az 5. táblázat tartalmazza.

4. táblázat. Feszültség értékek kéregi csontban, elmozdulás hatására

Meghúzási nyomaték [Nm]	Hertz feszültség max. [MPa]	Egyenértékű feszültség max. [MPa]
1	3952	1913
2	3927	1936
3	3910	1983

5. táblázat. Feszültség értékek Chirulen anyagban, elmozdulás hatására

Meghúzási nyomaték [Nm]	Hertz feszültség max. [MPa]	Egyenértékű feszültség max. [MPa]
1	54	29
2	61	33
3	77	38

A kéregi csont rendkívül rideg. Az elmozdulás hatására magas kontakt és egyenértékű feszültségek keletkeznek, jellemzően a legfelső menetspirál szintjén. Az alsóbb menetekben a feszültség 200 MPa nagyságrendű marad. Az implantátum anyagban a meneten ébredő kontakt feszültségek csúcserőértéke csökkent, ugyanakkor az átlagos feszültség növekedett. A lágy, rugalmas műanyag jól követi az esetleges deformációt

5. AZ EREDMÉNYEK ÉRTELMEZÉSE

A csavarment nyomáseloszlása jellegzetesen eltér csak előfeszített esetben és a külső húzó terhelés ráadása után. Csak előfeszített esetben a feszültség henger alakú térfogatrészben kíséri a csavart (**9. ábra**).



9. ábra. Feszültség eloszlás csontban, csak előfeszítéssel terhelve



10. ábra. Feszültség eloszlás csontban, előfeszítéssel és elmozdulással terhelve

Az elmozdulás terhelés ráadása után a feszültség értéke növekedik, és a felső menetrészekben koncentrálódik (**10. ábra**).

A HA2 profilú, 2 mm névleges átmérőjű csavar meghúzási nyomatéka jelentős hatással van az anyamenet mentén ébredő koncentrált feszültségre. A csont lokális túlterhelés elkerülése érdekében javasolt, hogy az orvos tartson be adott meghúzási nyomaték értéket.

Növekedő koponya esetén a csontnál sokkal keményebb anyagú titán implantátum beépítése ellenjavallott. Ekkor a titánnál viszonylag lágyabb csontszövetre adódik a növekedés okozta terhelés, és a csont a csavarok mentén károsodhat a magas mechanikai feszültségek miatt.

Növekvő koponya esetén javasolt a kéregi csonttal azonos rugalmassági modulussal rendelkező, vagy annál lágyabb anyag alkalmazása. Ekkor a lágy implantátum anyag deformációja tehermentesíti a csontba készített csavarkötést.

6. TOVÁBBI KUTATÁSI IRÁNYOK

Vizsgálatunk során statikus viselkedést feltételeztünk, időben állandó anyagjellemzőkkel. A modell tovább fejlesztése szükséges a műanyag időfüggő kúszási, illetve relaxációs jellemzőinek figyelembe vételével. Ugyanígy figyelembe vevendő a csont növekedéséből származó kúszás, illetve relaxáció hatása. További kutatási lehetőség a vastagabb csontok szivacsos belső szerkezetének hatása a modellenre.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A projekt a Nemzeti Kutatási és Innovációs Hivatal támogatásával az NKFIH alapból valósul meg. A projekt címe: *Egyénre szabott orvos-biológiai implantátumok és segédeszközök új generációs gyártási folyamatának kidolgozása additív technológiákra*. A pályázat azonosító száma: NVKP_16-1-2016-0022

8. IRODALOM

- [1] Fierro P., Lovas L. Koponya implantátum szilárdsági méretezésének kérdései. Gép, vol. LXVIII, 4. szám, pp 29-32, 2017.
- [2] Inzana J. A., Varga P., Windolf M. Implicit modeling of screw threads for efficient finite element analysis of complex bone-implant systems. Journal of Biomechanics, vol. 46, pp 1834-1844, 2016.
- [3] Lakatos É. A csont mikroszerkezetének mechanikai viselkedése fogászati implantátumok környezetében. Doktori értekezés, 2011. http://www.omikk.bme.hu/collecti- ons/phd/Epitomernoki_Kar/2012/Laka- tos_Eva/ertekezes.pdf. Leolvasás dátuma: 2018.10.10.
- [4] Oroszlány Á. Gyors prototípusgyártási technológiával előállított orvosi csavarok jellemzése. Doktori értekezés, <https://repo- zitorium.omikk.bme.hu/bitstream/handle/10890/1227/ertekezes.pdf?sequence=1&is- Allowed=y>. Leolvasás dátuma: 2018.10.10.
- [5] ISO 5835:1991 szabvány: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5835:ed-1:v1:en>. Leolvasás dátuma: 2018.10.10.

VÁLASZFELÜLETEK MÓDSZERÉNEK ALKALMAZÁSA GÉPJÁRMŰVEK AKUSZTIKAI VIZSGÁLATÁBAN

APPLICATION OF RESPONSE SURFACE METHODOLOGY IN CASE OF ACOUSTIC STUDIES OF VEHICLES

Lukács Judit, lukacs.judit@bgk.uni-obuda.hu
Melegh Gábor, PhD, CSc, gabor.melegh@gjt.bme.hu

ABSTRACT

The investigations of the vehicle interior in acoustic sense is a key question nowadays, since the sound quality is an important demand from consumer side. This paper deals with the objective evaluation of the sound pressure level in the cabin. By help of response surface methodology a model was introduced based on measured data. In addition, the applicability was verified by further confirmation measurements.

1. BEVEZETÉS

Napjaink személygépjárműveinek komplex elvárásokat kell teljesítenie mind gyártói, mind pedig felhasználói oldalról. A vásárlóközönség által támasztott kritériumok egyike a megfelelő mértékű utazási komfort biztosítása. Ez alatt nem csupán az ülések és egyéb működtető elemek (kormánykerék, sebességváltókar, kézifékkar, stb.) ergonomikus, kézre eső kialakítása értendő. Jelentős hangsúlyt kell fektetni az utastér akusztikai kényelmére is.

A környezetből érkező hanghatások kényelmi okok miatti tökéletes kizárása azonban közlekedésbiztonsági szempontból nem lehetséges. A kis intenzitású gépjármű ütközések (amikor az ütközési sebesség $v=1...5$ km/h [1]) vizsgálata során ugyanis kulcskérdés az észlelhetőség megítélése, ami alapján az eset a szándékossággal összefüggésbe hozható.

A balesetek észlelhetőségének megítélése nem teljes mértékben egyértelmű. Schneider [2] azt a folyamatot írja le, amely alapján egy szakértői vélemény során megállapításra kerül, hogy az ütközés a járművön belül észlelhető volt-e. Elsősorban három területet emel ki. A vizuális érzékelés azon alapul, hogy a sofőr látta-e az érintkezést. Személygépjárművek esetén elsősorban parkolóhelyről való kitolatáskor a vezetőülésből meglehetősen rossz látási viszonyok adódnak. Legfontosabb szempont a megítélésnél, hogy az ütközés bekövetkezésekor a vétkes sofőr tekintete a kontaktus felé irányult-e. Az akusztikus érzékelhetőség alatt az értendő, hogy

a balesetet kísérő hanghatás a járművön belül hallható volt-e. Ezt számos tényező befolyásolja. Háttérzajnak tekintendő a külső (motor és környezet) és a belső (rádió, klímaberendezés, egyéb) eredetű zajforrások összessége. Az utastér a külső hatások elől árnyékolva van, mely kis intenzitású ütközések esetén a hang érzékelhetőségét lényegesen rontja. A harmadik lehetőség – a taktilis és kinezetikai érzékelés – a bekövetkező lökés észlelésén alapul, felhasználva az egyensúlyérzetet. Ez elsősorban az érintkezési pont elhelyezkedésén múlik, mivel a karosszéria merevsége nem azonos. A gyengített részek közé tartoznak például az ajtók. Ennek következtében a lökés 75%-kal alacsonyabb szintű ajtónak ütközéskor, mint pl. a B-oszlop esetén.

Számos kutatás igazolta [3-6], hogy az esetlegesen bekövetkező közúti balesetek súlyosságát jelentős mértékben befolyásolja – a járművezető rutinjának mértékén felül – a gépkocsin belüli társaság jelenléte, viselkedése, jellemzői is.

Orsi és társai [3] azt tanulmányozták, hogy az utastársak jelenléte – mind fiatalabb, mind tapasztaltabb, idősebb sofőrök esetében – hogyan befolyásolja a közlekedési balesetek kimenetét. Vizsgálataik alapját az olaszországi Pavia városban 2004-2005-ben bejelentett incidensek képezték. Keresték az ütközések súlyosságát befolyásoló tényezőket.

Chung és társai [4] a tapasztalatlan koreai gépjárművezetők viselkedését tanulmányozták. Három vizsgálati csoportot különítettek el:

- egyedül vezetőket,
- tapasztalt, de passzív utassal közlekedőket és
- tapasztalt, aktívan résztvevő, vezetésbiztonsági tanácsokat adó társal utazókat.

Az összes megfigyelt személy ugyanazon szimulátorbeli pályaszakaszon haladt végig. Megállapították, hogy a legjelentősebb különbséget a segítő instrukciók jelentették. Az

ehhez tartozó csoport lényegesen lassabb tempóban, nagyobb körülményekkel közlekedett. A passzív utassal, valamint az egyedül vezetőik között a sebesség tekintetében érdemi eltérést nem tapasztaltak.

Bose és társai [5] a gépjárművezető a baleset során bekövetkező elhalálozásának kockázata és a hátsó ülésen tartózkodó nyughatatlan utas jelenléte közötti összefüggést vizsgálták az USA-ban 2001-2009 között bekövetkezett, halálos kimenetelű frontális karambolok esetén. Kizárólagosan olyan incidenseket vettek figyelembe, melyek 1998-as évjáratnál fiatalabb, kormánylégszákkal szerelt járműveket érintettek.

Lee és társai [6] az 1999-2003 közötti floridai balesetek alapján szoros összefüggést találtak az utasok és a baleset jellemzői között. Vizsgált paramétereik a járművezető kora és neme, valamint az utas(ok) életkora voltak.

Az észlelhetőség azonban számos egyéb tényezőtől is függ. Kulcskérdés a jármű belterének hangminősége is. Napjaink járműveivel szemben ugyanis jelentős vevői elvárás a megfelelő szintű utazási komfort biztosítása. Ez alatt értendő a kocsiszekrény zajszigetelő képessége, vagyis a környezetből érkező, nem kívánatos, zavaró hanghatások mértékének, erősségének tompítása, esetlegesen teljes kizárása.

Korábbi tanulmányok [7] során már vizsgáltuk a hanghatások gépjárművön belüli észlelhetőségét. Mérések elvégzésekor a vizsgálatba vont gépkocsit és a személyeket a tényleges forgalomtól leválasztottuk. A vizsgálatokat egy SKODA FABIA COMBI járművön végeztük el. Hangforrásként olyan hanggenerátort használtunk, mely tiszta szinuszos hang kibocsátására volt alkalmas széles frekvenciatartományban. A mérések célja a szignifikáns hatást jelentő faktorok kiszűrése volt, faktoriális kísérlettervezés módszerének alkalmazásával. A forgalomtól elzárt, alacsony alapzajszinttel rendelkező helyen elvégzett mérések diagnosztizált halláskárosodással nem rendelkező személyek bevonásával történtek. A 95%-os szinten szignifikáns faktorok meghatározásához Pareto-diagramokat használtunk, melyek eredményei a következők lettek:

- bal első ablak helyzete,
- motor üzemeltetése és
- ventilátor működtetése döntő mértékben befolyásolja a járművön belüli hangérzékelést.

Jelen kutatás a kocsiszekrénybe bejutó zajok objektív vizsgálatát, valamint meghatározását

mutatja be a válaszfelületek módszerének felhasználásával.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

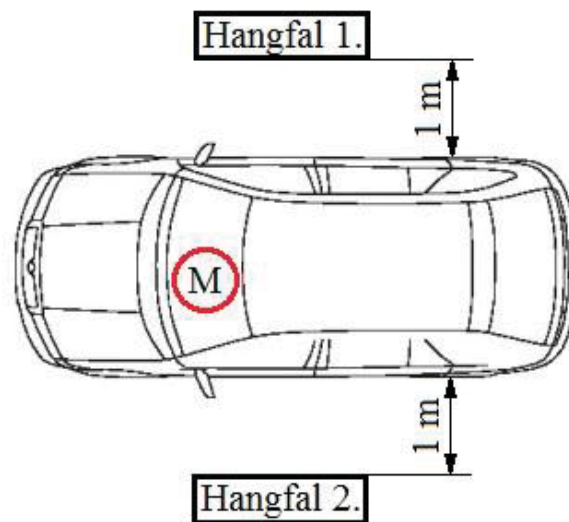
2.1. Vizsgálatba vont jármű és eszközök

Az akusztikai vizsgálatokat egy SKODA FABIA COMBI (évjárat: 2004; 1198 cm³ hengerűrtartalmú, 3 hengeres, 12 szelepes benzinmotorral szerelt – $P_{max} = 47$ kW) típusú személygépjárművön végeztük el.

A mérések végrehajtása során egy Hohner Stereo 50 kéthangfalas zajgenerátort és Svantek 959 típusú zajszintanalizátort használtunk.

2.2. Mérési elrendezés

A vizsgálatba vont személygépjármű tanulmányozása a valós forgalmi környezetből kiemelve, zárt térben, statikus állapotban történt. A mérési elrendezést szemlélteti az 1. ábra. A hangfalak („Hangfal 1.” és „Hangfal 2.”) a jármű két oldalán, attól 1 m távolságra lettek elhelyezve. A beltérben kialakuló egyenértékű hangnyomásszint mérését ISO 5128-1980 [8] előírásainak, valamint Putra és társai [9] ajánlásainak figyelembe vételével valósítottuk meg. A vizsgálatok végrehajtása csukott ajtók és ablakok mellett, a vezetőülés jobb oldalánál, a sofőr fülének magasságában elhelyezett zajszintmérő műszerrel (lásd „M”-mel jelölve a 1. ábrán) történtek.

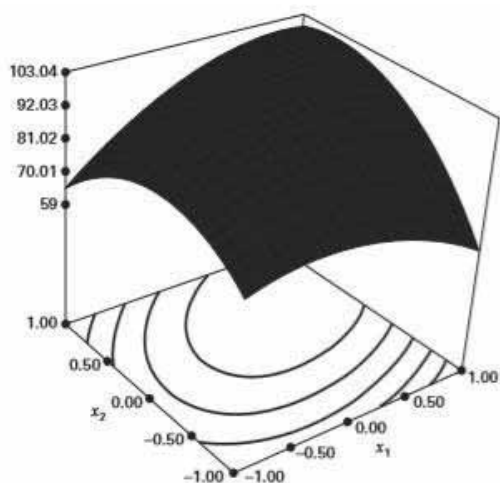


1. ábra. Mérési elrendezés

Az alkalmazott vizsgálójaj rózsazaj (pink zaj) volt, mely alatt akusztikai szempontból olyan véletlen zaj értendő, amelynek hangnyomásszintje az $f = 20 \dots 20\,000$ Hz-es frekvenciatartományban (hallható hang tartománya) oktávonként 3 dB-lel csökken [10].

2.3. Alkalmazott módszerek

A válaszfelületek módszere (Response Surface Methodology, RSM) számos matematikai és statisztikai eljárás kombinációja. Alkalmas a több tényezőtől függő problémák elemzésére, modellezésére és optimális beállítás meghatározására. A kimenetet függő változónak, az azt befolyásoló bemenő paramétereket független változóknak nevezzük. A módszer elnevezése onnan ered, hogy ha két bemenő paramétert vizsgálunk, a kimenet ezek függvényében háromdimenziós felületként ábrázolható (erre mutat egy lehetséges példát a 2. ábra).



2. ábra. A válaszfelület ábrázolása 2 független változó (x_1, x_2) esetén [11]

Több bemenő paraméter esetén is alkalmazható a válaszfelületek módszere, viszont ilyenkor a 3D grafikus megjelenítéshez egyszerre két tényező változtatható, a többi értékét rögzíteni kell [11-12].

A független változók és a kimenet közötti kapcsolat modellel írható le. Jelen tanulmány keretén belül egy másodrendű összefüggést alkalmaztunk, melyben az (1) egyenlet szerint (2 bemenő paraméter esetén) a bemenetek első és második hatványa, valamint a keresztszorzatuk szerepel:

$$y = A + B \cdot x_1 + C \cdot x_2 + D \cdot x_1^2 + E \cdot x_2^2 + F \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (1)$$

ahol x_1 és x_2 a független (bemeneti), y a függő (kimeneti) változó, A, B, C, D, E és F pedig empirikus úton meghatározott konstansok.

3. VIZSGÁLATOK

Az akusztikai mérések során bemenő paraméter a személygépjármű üzemállapota (x_1 ,

mértékegység nélküli, minőségi változó), valamint a külső térből érkező gerjesztő hanghatás (x_2 , dB) – mely adott esetben megfeleltethető az ütközést kísérő hangjelenségnek –, a függő változó a kocsiszekrényben mért egyenértékű hangnyomásszint (L_{Aeq} , dB) volt.

A mérések során a független változók három szinten kerültek beállításra, melyek kiválasztását egy megelőző tanulmány indokolta [7]. Értékeiket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. A beállítási paraméterek és szintjeik

Szint	Üzemállapot	Gerjesztés
	x_1 , -	x_2 , dB
0	(álló motor, segédberendezések üzemeltetése nélkül)	71,2
1	alpjárat	80,5
2	alpjárat + ventilátor II. fokozatban üzemeltetve	95,6

A vizsgálati pontokat a meghatározott beállítási paraméterek szintjeinek összes lehetséges kombinációja adta (9 eset).

3.1. Eredmények

A kiértékelés alapját a járműben utazó személyekre ható zajterhelést jellemző egyenértékű hangnyomásszint értékek adták, a mérések végrehajtása kétszer történt, véletlenszerű sorrendben. A kiértékeléskor a rögzített értékek átlagával dolgoztunk.

2. táblázat. Beállítási pontok és mérési eredmények

M. p.	x_1 , -	x_2 , dB	L_{Aeq1} , dB	L_{Aeq2} , dB	L_{Aeqm} , dB
1	0	0	47,1	47,3	47,20
2	0	1	57,5	57,4	57,45
3	0	2	72,7	72,8	72,75
4	1	0	49,2	49,5	49,35
5	1	1	60,1	60,3	60,20
6	1	2	72,6	72,7	72,65
7	2	0	55,3	55,4	55,35
8	2	1	60,5	60,3	60,40
9	2	2	72,3	72,0	72,15

A vizsgálati pontok független változóinak szintjét, valamint a mért egyenértékű hangnyomásszint értékeket (L_{Aeq1} , dB és L_{Aeq2} , dB) és átlagaikat (L_{Aeqm} , dB) a 2. táblázat tartalmazza.

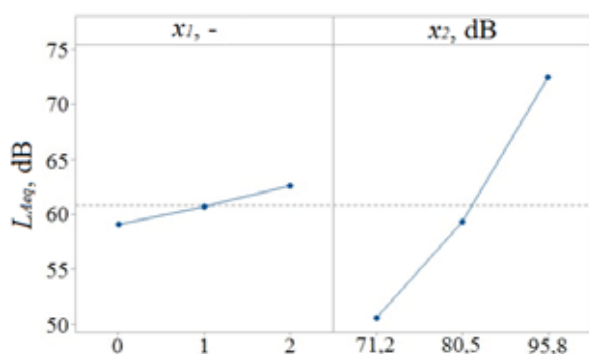
3. táblázat. Szignifikanciátáblázat

Modell eleme	Szignifikancia
konstans	✓
x_1	✓
x_2	✓
x_1^2	✗
x_2^2	✗
$x_1 \cdot x_2$	✓

3.2. Kiértékelés

A mérések kiértékelése a Minitab 17 szoftver segítségével történt.

Első lépésben a vizsgált paraméterek, a faktorok az utastérben kialakuló egyenértékű hangnyomásszintre való befolyását vizsgáltuk. Ezt szemléltetik a 3. ábrán látható főhatások; a szaggatott vonal az összes mért érték átlagát jelöli. Megállapítható, hogy mind a gépjármű üzemállapota, mind pedig a külső gerjesztés növeli a kocsiszekrényben mérhető egyenértékű hangnyomásszintet. Az effektusok mértékére az egyenesek meredekségéből lehet következtetni. Például közel vízszintes főhatás esetén megállapítható lenne, hogy az adott faktor befolyása elhanyagolható; illetve 90°-nál nagyobb dőlésszög esetén (negatív meredekség) az adott paraméter szintjének növelése csökkentené a kimenet értékét. A mérések során mindkét vizsgált faktor főhatása pozitív meredekségű lett, ami azt jelenti, hogy a szintjük növelése a beltér zajszintjében emelkedést eredményez. Azonban megállapítható az is, hogy a gerjesztés dőlésszöge nagyobb, ennek következtében jelentősebb mértékű hatása van a kimenetre. Viszont az üzemállapot sem elhanyagolható.



3. ábra. Főhatásábrák

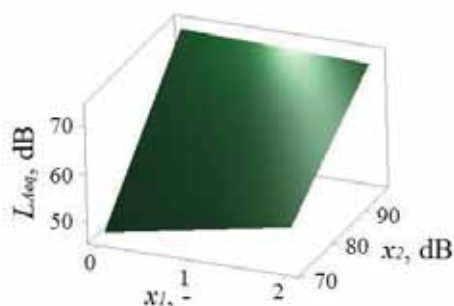
A fentiek figyelembevételével a mért értékekre az (1) egyenletnek megfelelő másodrendű empirikus modellt illesztettünk. A függő változó (az (1) egyenletben y) pedig az utastérben kialakuló egyenértékű hangnyomásszint (L_{Aeq} , dB) lett.

Az ilyen módon konstruált tapasztalati összefüggés tartalmazhat azonban olyan tagokat is, melyek kimenetre gyakorolt hatása kis mértékű. Ezen elemek kiválasztására alkalmas módszer a szignifikanciavizsgálat, melynek eredményét a 3. táblázat ismerteti.

A személygépjármű utastérben kialakuló egyenértékű hangnyomásszint meghatározására alkalmas, a (2) egyenletben szereplő redukált modell, már a szignifikanciavizsgálat eredményei alapján került meghatározásra:

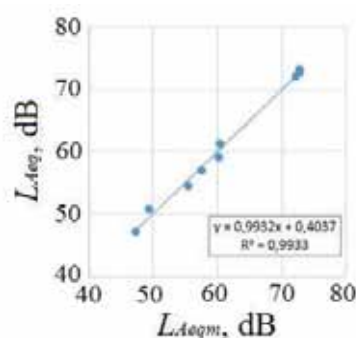
$$L_{Aeq} = -28,24 + 15,92 \cdot x_1 + 1,0584 \cdot x_2 - 0,1717 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (2)$$

A (2) egyenlet grafikus ábrázolása látványosan mutatja a bemenő paraméterek kimenetre gyakorolt hatását (lásd 4. ábra).



4. ábra. Az (2) egyenlet 3D grafikus ábrázolása

A (2) egyenletben szereplő tapasztalati összefüggés pontosságát grafikus úton szemlélteti az 5. ábra.



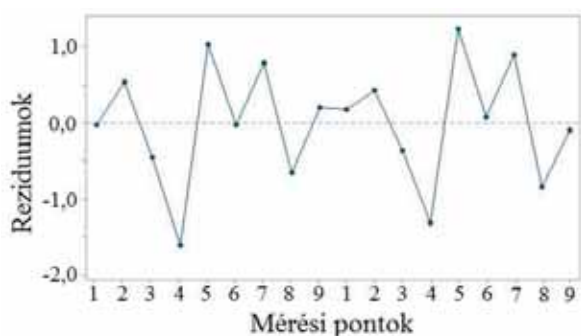
5. ábra. Az empirikus modell pontosságának grafikus szemléltetése

Ha derékszögű koordinátarendszerben ábrázoljuk a számított értékeket (függőleges tengely) a mért értékek átlagának (vízszintes tengely) a függvényében, ideális esetben (tökéletes illeszkedéskor, amikor a mért és a számított értékek megegyeznek) egy 45°-os dőlésszögű (meredekség: $m=1$) egyenes illeszkedne a pontokra. Ennek egyenlete a (3) szerint alakulna:

$$y = x \quad (3)$$

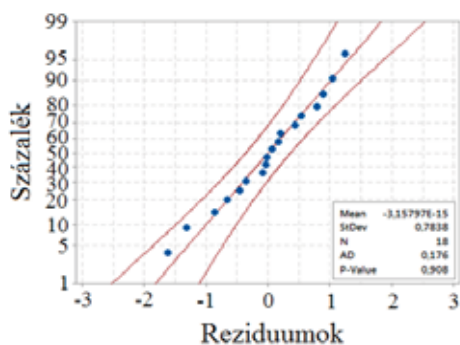
Az 5. ábra alapján megállapítható, hogy a pontokra illesztett egyenes jól közelíti a (3) egyenletben leírtat, így a felállított empirikus modell alkalmas a beltérben kialakuló egyenértékű hangnyomásszint megfelelő pontossággal történő számítására.

Egy tapasztalati összefüggés jósága a reziduumok mértékével és eloszlásával is jellemezhető. Reziduumok alatt a mért és számított értékek közötti különbséget értjük.



6. ábra. Reziduumok nagyságrendi alakulása

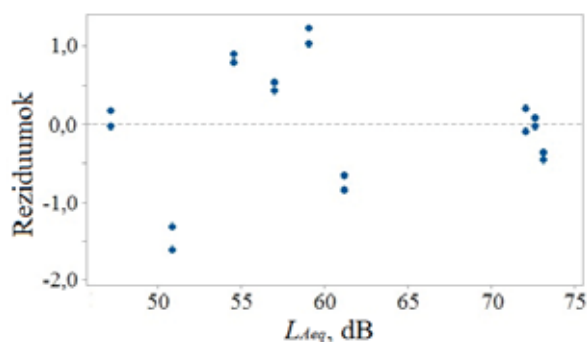
A 6. ábra az eltérések nagyságrendi alakulását szemlélteti a mérési pontokban. Értékük $-1,7 \dots 1,2$ dB ($\pm 3\%$ -on belüli pontosság) között alakul, ami megfelelően kis mértékű pontatlanságnak tekinthető.



7. ábra. Reziduumok ábrázolása normalitáshálón

Normalitáshálón (lásd 7. ábra) a reziduumok eloszlása vizsgálható. Megfelelőnek minősíthető a modell, ha az eltérések normál eloszlást követnek ($P\text{-Value}=0,908 > 0,05$), várható értékük 0 ($Mean = -3,15797 \cdot 10^{-15}$) és szórásuk kicsi (jelen esetben $StDev = 0,7838$).

Végül vizsgálandó a reziduumok nagyságának változása a mérési tartományban. A 8. ábrán látható, hogy a reziduumok nagyságrendje nem változik a vizsgált paramétertartományban, így a (2) egyenletben bemutatott empirikus modell megfelelőnek tekinthető.



8. ábra. Reziduumok nagyságának változása

A reziduum-vizsgálatok tehát alátámasztották, hogy a (2) egyenletben szereplő tapasztalati összefüggéssel jó közelítéssel számolható az utastérben kialakuló egyenértékű hangnyomásszint a beállítási paraméterek vizsgált tartományában.

3.3. Konfirmáló mérések

A beltérben kialakuló egyenértékű hangnyomásszint számítására meghatározott empirikus modell (lásd (2) egyenlet) megadott paramétertartományon való alkalmazhatóságának igazolására konfirmáló méréseket is végrehajtottunk.

4. táblázat. A konfirmáló méréssorozat beállítási paramétereit, eredményeit és a (2) modellel történő összehasonlítását

Mérés	x_1 , -	x_2 , dB	L_{Aeqm} , dB	L_{Aeq} , dB	ΔL , %
1	0	83,1	59,9	59,71	0,32
2	1	74,8	53,6	54,01	-0,76
3	2	91,7	69,7	69,16	0,77

Ebben a sorozatban olyan értékeket választottunk, melyek a vizsgált paramétertartományon belül található értékek, viszont az eredeti kísérletek során nem lettek beállítva, így az egyenlet építéskor nem lettek

figyelembe véve. Mivel a gépjármű üzemállapota csak diszkrét értékeket vehet fel, mindhárom esetet vizsgáltuk. A konfirmáló mérések beállítási paramétereit a 4. táblázat tartalmazza.

Megállapítható, hogy a konfirmáló mérések során kapott eredményeket jól közelíti a (2) egyenlet, tehát a modell pontossága megfelelő a vizsgált paramétertartományon.

4. ÖSSZEGZÉS

Jelen tanulmány célja a személygépjármű utasterében tapasztalható, a zajterhelés objektív megítélésére alkalmas empirikus egyenlet megalkotása volt.

A vizsgálatok során a kiválasztott független, bemenő paraméterek (a gépjármű üzemállapota és a kültérből érkező gerjesztő zaj) 3 szinten kerültek beállításra. A beltérben rögzítésre került az egyenértékű hangnyomásszint ezek minden lehetséges kombinációja esetén.

A mérés során kapott eredményekre a válaszfelületek módszerének felhasználásával másodrendű tapasztalati összefüggést alkottunk meg (lásd (2) egyenlet). Az alkalmazhatóság vizsgálata során az alábbi megállapításokat tettük:

- a (2) egyenlet alkalmas az utasterben kialakuló egyenértékű hangnyomásszint megfelelő pontosságú számítására ($\pm 3\%$),
- reziduum-vizsgálatok igazolták a felírt empirikus modell jóságát, amelyek alapján kijelenthető, hogy a reziduumok értéke kicsi ($-1,7 \dots 1,2$ dB), nagyságrendjük a teljes vizsgált paramétertartományban közel azonos,
- a reziduumok normál eloszlást követnek 0-hoz közeli várható értékkel és kis szórással,
- az alkalmazhatóságot további konfirmáló mérésekkel támasztottuk alá, melyek során szintén kis mértékű eltérést tapasztaltunk a mért és a számított értékek között.

Összességében tehát megállapítható, hogy a (2) egyenletben bemutatott modell alkalmas az utasterben kialakuló zajterhelés megfelelő pontosságú számítására a vizsgált paramétertartományban.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők szeretnék megköszönni Szabó Dániel, a Zajkontroll Kft. munkatársának segítő együttműködését.

6. IRODALOM

- [1] Schmedding K: Leichtkollisionen. Wahrnehmbarkeit und Nachweis von Pkw-Kollisionen, Vieweg+Teubner Verlag (2012) ISBN: 978-3-8348-2006-8 DOI 10.1007/973-3-8348-2007-5
- [2] Schneider S.: „Unfallflucht” – oder war der Anstoß für den Fahrer nicht wahrnehmbar?, Verkehrsband Ruhr-Rhein 6/2005 (2005)
- [3] Orsi C. et al.: Car crashes: The effect of passenger presence and other factors on driver outcome, Safety Science 57 35–43. (2013) DOI 10.1016/j.ssci.2013.01.017
- [4] Chung E. K. et al.: Effects of an adult passenger on young adult drivers' driving speed: Roles of an adult passenger's presence and driving tips from the passenger, Accident Analysis and Prevention 67 14–20. (2014) DOI 10.1016/j.aap.2014.01.024
- [5] Bose D. et al.: Increased risk of driver fatality due to unrestrained rear-seat passengers in severe frontal crashes, Accident Analysis and Prevention 53 100–104. (2013) DOI 10.1016/j.aap.2012.11.031
- [6] Lee C., Abdel-Aty M.: Presence of passengers: Does it increase or reduce driver's crash potential?, Accident Analysis and Prevention 40 1703–1712. (2008) DOI 10.1016/j.aap.2008.06.006
- [7] Lukács J., Melegh G.: Sound perception inside a stationary vehicle in case of frontal audio source, ÓBUDA UNIVERSITY E-BULLETIN 7: (1): pp. 57-61. (2017)
- [8] ISO 5128-1980 Measurement of Noise inside Motor Vehicles (1980)
- [9] Putra A. et al.: On a simple technique to measure the airborne noise in a car interior using substitution source, International Journal of Vehicle Sound and Vibration 8 (3) 275-287. (2012)
- [10] Kyon, D. H. et al.: Hi-pass Pink Noise: Its Acoustic Features and Standard Volume. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 8(6), 229-236. (2013)
- [11] Montgomery D. C.: Design and Analysis of Experiments, John Wiley and Sons, Inc. (2012) ISBN 978-1-118-14692-7
- [12] Myers R. H. et al: Response surface methodology- Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley and Sons, Inc. (2016) ISBN 978-0-470-17446-3

FORGATÓ CSAVARRUGÓ MODELLEZÉSE ÉS IGÉNYBEVÉTELEI

MODELING AND LOADS OF HELICAL TORSION SPRINGS

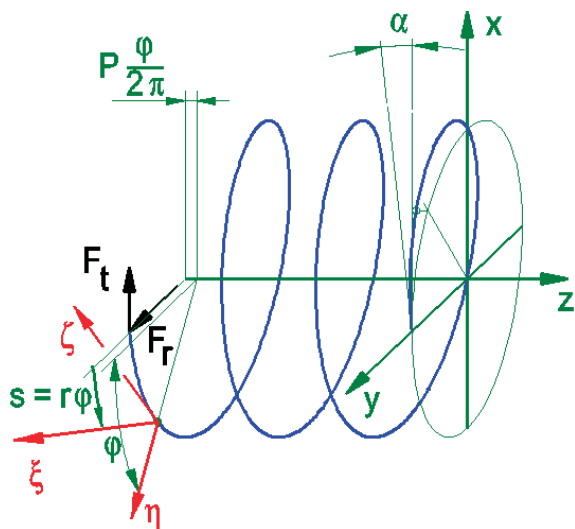
Németh Géza MSc, machng@uni-miskolc.hu

ABSRTACT

One of the essential conditions of the operation of epicyclic traction drives is the clamping force between the rolling elements. The author introduced a drive in some of his previous papers, containing helical torsion spring which integrate the functions of driving and clamping of the elements [1, 2]. The spring is in contact with the planet wheels. This paper try to make a model to calculate the loads of this flexible annual wheel.

1. BEVEZETÉS

Szándékunk szerint egy kb típusú dörzsbolygó-műnek a nyugvó, állványhoz rögzített gyűrűkerekét szeretnénk modellezni, mely jelen estben egy forgató csavarrugó. Helyezzük tehát a különleges terhelésű forgató csavarrugót az 1. ábrának megfelelő xyz derékszögű koordináta rendszerbe. A csavarvonal – mely a csavarrugó középvonala – egyik vége be van fogva, a befogási hely a $(0, r, 0)$ koordinátákkal írható le. A csavarvonal P emelkedésű, a menetek száma négy. Hason a csavarvonal szabad végétől φ szögtávolságra egy F_r sugár irányú és egy F_t érintő irányú erő, ahol $F_t \leq \mu_0 \cdot F_r$, és μ_0 a nyugvó súrlódás tényezője a csavarrugó és a vele belülről érintkező henger (bolygókerék) kent felületei között.



1. ábra Modellezés statikailag határozott térgörbe tartóként

Jelöljük az erőhatás helyét B -vel, a keresett igénybevétel (illetve a későbbiekben a sugárirányú alakváltozás) helyét pedig P -vel. Az

igénybevételek leírásához a következő szempontokat kell figyelnünk:

1. A csavarvonal egyenlete,
2. Koordináta transzformáció,
3. Több erő hatásának összegzése,

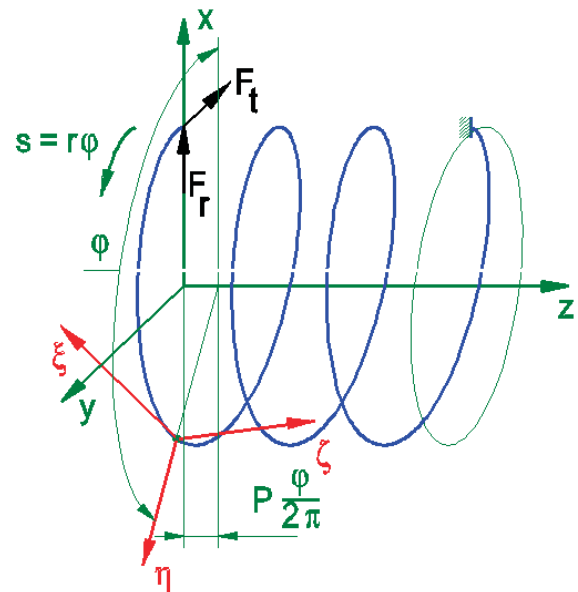
2. A CSAVARVONAL VIZSGÁLATA

A csavarvonal egyenletének jól ismert alakja a

$$\underline{P}^T(\varphi) = \{r \cos(\varphi); r \sin(\varphi); c\varphi\} \quad (1)$$

ahol a $c = r \operatorname{tg}(\alpha) = P/(2\pi)$ csavarparaméter az emelkedés függvénye.

Az egyszerűbb számítás kedvéért módosítsuk a koordináta rendszert a 2. ábrának megfelelően. Látható, hogy a P pontban egy $\xi\eta\zeta$ helyi koordináta rendszert vettünk fel.



2. ábra Modell a módosított koordináta rendszerekkel

A csavarparaméter kifejtése után az (1) egyenlet átírható a

$$[P(\varphi)]^T = r\{\cos(\varphi); \sin(\varphi); \operatorname{tg}(\alpha)\varphi\} \quad (2)$$

alakba, majd a kísérő háromél egységvektorainak képzéséhez először képezzük ennek differenciálját, azaz

$$[\underline{P}'(\varphi)]^T = r\{-\sin(\varphi); \cos(\varphi); \operatorname{tg}(\alpha)\}, \quad (3)$$

és ennek abszolút értéke

$$|\underline{P}'(\varphi)| = r\sqrt{\sin^2(\varphi) + \cos^2(\varphi); \operatorname{tg}^2(\alpha)}. \quad (4)$$

Az érintő irányú egységvektor

$$e_1^T = -\frac{[\underline{P}'(\varphi)]^T}{|\underline{P}'(\varphi)|} = \{\cos(\alpha) \sin(\varphi); -\cos(\alpha) \cos(\varphi); -\sin(\alpha)\}. \quad (5)$$

A P pontbeli keresztmetszet normálisa ez az érintő egységvektor lesz. A keresztmetszet egyik főiránya a csavarvonal tengelyvonalára, z -re merőleges, kifelé mutató, sugár irányú. Legyen ez e_2 , azaz

$$e_2^T = \{\cos(\varphi); \sin(\varphi); 0\}. \quad (6)$$

A keresztmetszet másik főiránya pedig legyen az előző két egységvektorra merőleges. A művelet elvégzése után

$$e_3^T = [e_1 \times e_2]^T = \{\sin(\alpha) \sin(\varphi); -\sin(\alpha) \cos(\varphi); \cos(\alpha)\}. \quad (7)$$

3. AZ IGÉNYBEVÉTELEK

A P pontbeli $\xi\eta\zeta$ helyi koordináták egy jobbsodrású koordináta rendszert alkotnak, és a koordináták irányába mutató egységvektorok rendre e_1, e_2, e_3 . Ebből a három egységvektorból képezhetünk egy A jelű átviteli mátrixot, és ennek segítségével a külső terheléseknek a P pontba redukálása után a P pontbeli igénybevételeket nyerhetjük. Az átviteli mátrix tehát

$$A = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \sin(\varphi) & -\cos(\alpha) \cos(\varphi) & -\sin(\alpha) \\ \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ \sin(\alpha) \sin(\varphi) & -\sin(\alpha) \cos(\varphi) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Az egy pontban ható külső terheléseknek a P -be redukált vektorkettőse az $[F(\varphi), M(\varphi)]_P$, melyből a helyi koordináta rendszerben az igénybevételeket a $v(\varphi)_P$ és $m(\varphi)_P$ vektorok tartalmazzák, azaz

$$[v(\varphi)_P]^T = \{n(\varphi); v_1(\varphi); v_2(\varphi)\}, \quad (9)$$

illetve

$$[m(\varphi)_P]^T = \{t(\varphi); m_1(\varphi); m_2(\varphi)\}. \quad (10)$$

Az igénybevételeket a

$$\begin{bmatrix} v(\varphi) \\ m(\varphi) \end{bmatrix}_P = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F(\varphi) \\ M(\varphi) \end{bmatrix}_P \quad (11)$$

egyenlet szolgáltatja, ahol a redukált vektorkettős koordinátái az xyz koordináta rendszerben

$$[F(\varphi)]^T = \{F_x(\varphi); F_y(\varphi); F_z(\varphi)\}, \quad (12)$$

és

$$[M(\varphi)]^T = \{M_x(\varphi); M_y(\varphi); M_z(\varphi)\}. \quad (13)$$

Mivel a (9), (10), (12) és (13) vektorok mindegyik összetevője φ függvénye, ezeket a (11) egyenletbe helyettesítjük, de a (8) mátrixot csak egyszerűsítve írjuk, azaz

$$\begin{bmatrix} n(\varphi) \\ v_1(\varphi) \\ v_2(\varphi) \\ t(\varphi) \\ m_1(\varphi) \\ m_2(\varphi) \end{bmatrix}_P = \begin{bmatrix} & A & & & & 0 \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ 0 & & & & & A \\ & & & & & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_x(\varphi) \\ F_y(\varphi) \\ F_z(\varphi) \\ M_x(\varphi) \\ M_y(\varphi) \\ M_z(\varphi) \end{bmatrix}_P \quad (14)$$

Az igénybevételeket tartalmazó vektor a (14) egyenlet által kijelölt szorzás után

$$\begin{bmatrix} n(\varphi) \\ v_1(\varphi) \\ v_2(\varphi) \\ t(\varphi) \\ m_1(\varphi) \\ m_2(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \sin(\varphi) F_x(\varphi) & -\cos(\alpha) \cos(\varphi) F_y(\varphi) & -\sin(\alpha) F_z(\varphi) \\ \cos(\varphi) F_x(\varphi) & +\sin(\varphi) F_y(\varphi) & \\ \sin(\alpha) \sin(\varphi) F_x(\varphi) & -\sin(\alpha) \cos(\varphi) F_y(\varphi) & +\cos(\alpha) F_z(\varphi) \\ \cos(\alpha) \sin(\varphi) M_x(\varphi) & -\cos(\alpha) \cos(\varphi) M_y(\varphi) & -\sin(\alpha) M_z(\varphi) \\ \cos(\varphi) M_x(\varphi) & +\sin(\varphi) M_y(\varphi) & \\ \sin(\alpha) \sin(\varphi) M_x(\varphi) & -\sin(\alpha) \cos(\varphi) M_y(\varphi) & +\cos(\alpha) M_z(\varphi) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

4. A REDUKÁLT VEKTORKETTŐS

A $[F(\varphi), M(\varphi)]_P$ redukált vektorkettősnek a (15) egyenletben szereplő összetevőit azonban még nem ismerjük. A csavarvonalra ható erőket és nyomatékokat először a P pontba kell redukálni (áthelyezni). Az összegzéskor azonban csak azokat a terheléseket kell figyelembe venni, amelyek koordinátáira a

$$\varphi_B \leq \varphi_P$$

egyenlőtlenség igaz, vagyis amely B pontban ható erők és nyomatékok közelebb vannak a szabad véghez, mint a P pont, ahol az igénybevételeket keressük. N bolygókerék és z menetszám esetén, a $t = 0$ időpillanatban a külső terhelések (jelen esetben sugár irányú és érintő irányú erők) helye szögkoordinátával kifejezve a 3. ábra szerint

$$\varphi_{B1} = 0; \varphi_{B2} = \frac{2\pi}{N}; \dots; \varphi_{Bi} = i \frac{2\pi}{N}; \dots; \varphi_{B(zN)} = z2\pi. \quad (16)$$

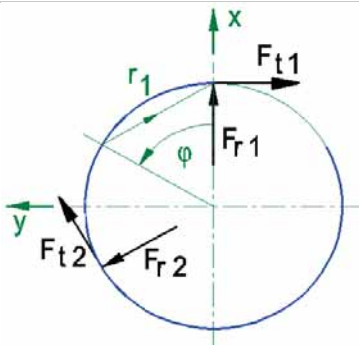
5. AZ ERŐK ÖSSZEGZÉSE

A P pontba redukált erő koordinátái tehát a 3. ábra szerint, a (12) egyenlet átírásával ($j = 2$ esetére)

$$[F(\varphi)] = \begin{bmatrix} F_x(\varphi) \\ F_y(\varphi) \\ F_z(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{r1} + F_{r2} \cos\left[\frac{2\pi}{N}(i-1)\right] + F_{t2} \sin\left[\frac{2\pi}{N}(i-1)\right] \\ -F_{t1} + F_{r2} \sin\left[\frac{2\pi}{N}(i-1)\right] - F_{t2} \cos\left[\frac{2\pi}{N}(i-1)\right] \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

általánosabban pedig

$$[F(\varphi)] = \begin{bmatrix} F_x(\varphi) \\ F_y(\varphi) \\ F_z(\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^j \left\{ F_{ri} \cos\left[(i-1)\frac{2\pi}{N}\right] + F_{ti} \sin\left[(i-1)\frac{2\pi}{N}\right] \right\} \\ \sum_{i=1}^j \left\{ F_{ri} \sin\left[(i-1)\frac{2\pi}{N}\right] - F_{ti} \cos\left[(i-1)\frac{2\pi}{N}\right] \right\} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$



3. ábra A külső erők helyzete a $t = 0$ időpontban

A (18) egyenletben az összegzés kiemelhető, így

$$[F(\varphi)] = \begin{bmatrix} F_x(\varphi) \\ F_y(\varphi) \\ F_z(\varphi) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^j \begin{bmatrix} F_{ri} \cos\left[(i-1)\frac{2\pi}{N}\right] + F_{ti} \sin\left[(i-1)\frac{2\pi}{N}\right] \\ F_{ri} \sin\left[(i-1)\frac{2\pi}{N}\right] - F_{ti} \cos\left[(i-1)\frac{2\pi}{N}\right] \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

illetve

$$[F(\varphi)] = \begin{bmatrix} F_x(\varphi) \\ F_y(\varphi) \\ F_z(\varphi) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^j \begin{bmatrix} \cos[(i-1)2\pi/N] & \sin[(i-1)2\pi/N] & 0 \\ \sin[(i-1)2\pi/N] & -\cos[(i-1)2\pi/N] & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{ri} \\ F_{ti} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

ahol

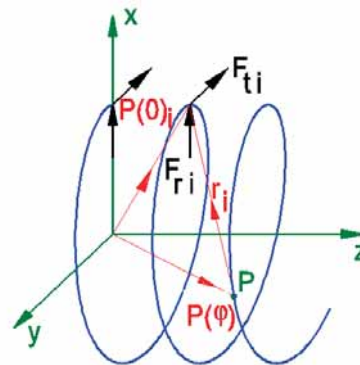
$$j = \text{ent}\left(\frac{\varphi}{2\pi/N}\right), \quad (21)$$

és ent() egészrész függvény. Azt mondja meg, hány erő hat a kiválasztott P ponttól a szabad vég felé, i pedig a kiválasztott P ponttól a szabad vég felé eső terhelési helyek sorszáma.

A (19) egyenlet egyszerűbben is írható, ha az egyenlet jobb oldalán álló mátrixot (forgató tenzort) R_i -vel, a szorzó külső erők vektorát pedig, mely az i -edik pontban hat, F_i -vel jelöljük, azaz

$$[F(\varphi)] = \begin{bmatrix} F_x(\varphi) \\ F_y(\varphi) \\ F_z(\varphi) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^j (R_i \cdot F_i). \quad (22)$$

A redukált vektorkettősben a nyomatékok számításakor megállapíthatjuk, hogy az 1. ábra szerinti modellben koncentrált nyomaték nem hat, így csak a külső erők nyomatékával kell számolni. A számításhoz a 4. ábra nyújt némi magyarázatot.



4. ábra Az $M(\varphi)$ nyomatékok számítása

Az ábrán $P(0)_i$ jelöli az i -edik erőátadási pont helyvektorát az xyz koordináta rendszerben, $P(\varphi)$ pedig annak a pontnak a helyvektorát, ahol az igénybevételt (és később az alakváltozást) keresem. A két pont közötti $r_i = P(0)_i - P(\varphi)$ vektor az erőhatás helyének (16) szögkoordinátával leírt helyének illetve a csavarvonal (1)-beli egyenletének ismeretében

$$[r_i(\varphi)] = r \cdot \begin{bmatrix} \cos(i2\pi/N) - \cos(\varphi) \\ \sin(i2\pi/N) - \sin(\varphi) \\ \text{tg}(\varphi) (\varphi - i2\pi/N) \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Az i -edik pontban ható erő nyomatéka pedig

$$[M(\varphi)] = \begin{bmatrix} M_x(\varphi) \\ M_y(\varphi) \\ M_z(\varphi) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^j (r_i \times F_i) . \quad (24)$$

A vektoriális szorzás elvégzésével az

$$[M(\varphi)] = r \cdot \sum_{i=1}^j (S_i \cdot F_i) \quad (25)$$

alakhoz juthatunk, ahol az S_i mátrix

$$S_i = \begin{bmatrix} 0 & -\operatorname{tg}(\alpha) (\varphi - i2\pi/N) & 0 \\ \operatorname{tg}(\alpha) (\varphi - i2\pi/N) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi) - \sin(i2\pi/N) & \cos(i2\pi/N) - \cos(\varphi) & 1 \end{bmatrix} . \quad (26)$$

Ezek után a (11) összefüggésbe behelyettesíthetjük a (22) és (25) kifejezéseket, így számíthatjuk az igénybevételeket, azaz

$$\begin{bmatrix} v(\varphi) \\ m(\varphi) \end{bmatrix}_p = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F(\varphi) \\ M(\varphi) \end{bmatrix}_p = \sum_{i=1}^j \begin{bmatrix} AR_i \\ r \cdot AS_i \end{bmatrix} F_i . \quad (27)$$

A mátrix és vektorszorzások elvégzése után az igénybevételeket a következő egyszerűsítő jelölésekkel hozhatjuk kezelhető alakra.

$$\begin{aligned} c &\rightarrow \cos; s \rightarrow \sin; t \rightarrow \operatorname{tg}; \\ f(i) &\rightarrow (i-1)2\pi/N; g(i) \rightarrow i2\pi/N \end{aligned} \quad (28)$$

A számítások eredménye tehát

$$n = c(\alpha) \sum_{i=1}^j \{ \{ c[f(i)]s(\varphi) - s[f(i)]c(\varphi) \} + \{ s[f(i)]s(\varphi) + c[f(i)]c(\varphi) \} F_{ti} \} \quad (29)$$

$$v_1 = \sum_{i=1}^j \{ \{ c[f(i)]c(\varphi) - s[f(i)]s(\varphi) \} F_{ri} + \{ s[f(i)]c(\varphi) - c[f(i)]s(\varphi) \} F_{ti} \} \quad (30)$$

$$v_2 = s(\alpha) \sum_{i=1}^j \{ \{ c[f(i)]s(\varphi) - s[f(i)]c(\varphi) \} F_{ri} + \{ s[f(i)]s(\varphi) - c[f(i)]c(\varphi) \} F_{ti} \} \quad (31)$$

$$t = r \cdot s(\alpha) \sum_{i=1}^j \{ \{ s[g(i)] - s(\varphi) + [g(i) - \varphi]c(\varphi) \} F_{ri} - \{ c[g(i)] - c(\varphi) + [\varphi - g(i)]s(\varphi) \} F_{ti} \} \quad (32)$$

$$m_1 = r \cdot t(\alpha) \sum_{i=1}^j \{ \{ [\varphi - g(i)]s(\varphi) \} F_{ri} - \{ [\varphi - g(i)]c(\varphi) \} F_{ti} \} \quad (33)$$

$$m_2 = r \cdot \sum_{i=1}^j \{ \{ s(\alpha)t(\alpha)[g(i) - \varphi]c(\varphi) + c(\alpha)[s(\varphi) - s[g(i)]](\varphi) \} F_{ri} + \{ s(\alpha)t(\alpha)[g(i) - \varphi]s(\varphi) + c(\alpha)[c[g(i)] - c(\varphi)] \} F_{ti} \} \quad (34)$$

6. AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEGZÉSE

Ezzel megkaptuk a tetszőleges φ szöghöz tartozó P pontban az igénybevételeket, melyek közül várhatóan m_2 a legnagyobb.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

"A cikkben/előadásban/tanulmányban ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg”

"The described article/presentation/study was carried out as part of the EFOP-3.6.1-16-2016-00011 "Younger and Renewing University – Innovative Knowledge City – institutional development of the University of Miskolc aiming at intelligent specialisation" project implemented in the framework of the Széchenyi 2020 program. The realization of this project is supported by the European Union, co-financed by the European Social Fund."

8. IRODALOM

- [1] Németh Géza, Németh Nándor, Péter József, Dörzsbolygómű hajlékony elemeinek szilárdsági számítása, In: Bodzás Sándor (szerk.), Műszaki Tudomány az Észak - Kelet Magyarországi Régióban 2015 Konferencia előadásai, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, ISBN 978-963-7064-32-6, 2015. pp.213-219.
- [2] Németh Géza, Péter József, Németh Nándor, A new type of epicyclic traction drive, Advances in Mechanical Engineering, 1:(1) pp. 137-142. (2013), 1st International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering. Debrecen, Magyarország: 2013.10.10 -2013.10.11. (ISBN 978-963-473-623-3).

KENT ACÉL FELÜLETPÁROK SÚRLÓDÁSÁNAK VIZSGÁLATA

FRICITION ASSESMENT OF LUBRICATED STEEL PAIRS OF SURFACES

Németh Géza MSc,
adjunktus
Miskolci Egyetem
Gép- és Terméktervezési Intézet

ABSTRACT

The coefficient of kinetic friction is a random variable. Its value is governed by a huge number of circumstances. Studying some widely known methods, one of them was improved and made applicable to analyse the rolling resistance of antifriction bearings. The rolling resistance depends mainly on the load, the type of supplied lubricant, the number of speed and the service temperature. Although the suggested test rig is currently under development, it seems to be able to select the proper lubricant for the given installation environment and operation conditions.

1. BEVEZETÉS

A súrlódási tényező nagyon sokféleképpen elemezhető. Természetesen mondhatjuk, hogy a Coulomb-féle súrlódási törvény igaz, mely szerint légköri viszonyok között a súrlódási tényező az egymással érintkező, egymáshoz képes elmozduló felületek anyagminőségétől függ. Ezt a jól ismert szemléletet az elmúlt évszázadban igen sokan, igen sok szempont figyelembe vételével árnyalták. Csak néhányat kérdést említenék ezek közül, vizsgálatainkat acél felületekre szűkítve.

1. Van-e valamilyen közeg (fluidum, szilárd anyag, esetleg szilárd bevonat vagy mindkettő a kérdéses felületek között)?
2. Milyen fizikai-kémiai állapotúak a felületek? A légköri viszonyoknak megfelelő technikai felülettel van dolgunk, vagy tiszta alapfém felülettel, módosult alapfémrel, fém-oxigén szilárd oldattal, szennyezett felülettel? Milyen erősen kötődnek egymáshoz az egyes rétegek?
3. A felületek érdessége, a felületek között ható normálerő nagysága mekkora? A köztük lévő fluidum és bevonat, a csúszási sebesség együttesen milyen súrlódási állapotot hoz létre?
4. Milyen a környezeti nyomás és hőmérséklet?
5. Milyen járulékos folyamatok jelentkeznek (kopás, melegedés) és milyen mértékben?

Ezeknek az egyszerű kérdéseknek a figyelembe vétele csak több szakterület együttműködésével lehetséges. Számptalan szakkönyv, pl. [1], tudományos értekezés [2] készült a témában, felhasználta a méréshez és modellezéshez a kor műszaki színvonalán rendelkezésre álló lehetőségeket. Dolgozatunk célja, hogy bemutasson néhány általános és célzott kísérleti lehetőséget a gépelemek között fellépő súrlódási viszonyok tisztázására, és szerény mértékben hozzájáruljon a mérési tapasztalatok bővítéséhez.

2. A SÚRLÓDÁSI TÉNYEZŐ MEGHATÁROZÁSA

Valamilyen fizikai elv alapján végezhetjük a súrlódási tényező mérését. A módszer lehet általános, de korlátozódhat egy kinematikai párra is. Egy-egy jól ismert általános elvet mutat a 2. és 3. ábra, a nyugvó illetve a mozgó súrlódási tényező meghatározásához. Előbbi szögmerésen, utóbbi erőmérésen alapul. A 3. ábra egy mozgató orsó-anya kapcsolat súrlódási viszonyainak tisztázására szolgáló elvet mutat be [3]. Segítségével megállapítjuk a teheremelés

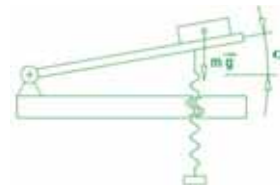
illetve a teher süllyesztés nyomatékigényét, az ismert számító modell szerint pedig a súrlódási tényező értékét az orsó-anya kapcsolatban. Az ábrán jelölt \vec{F} erővektor magába foglalja az orsó, a kötéldob és a teher súlyerejét. A fokozatosan növelt m tömegek által létrehozott erőpárnak a D átmérőjű kötéldobon létrehozott nyomatéka győzi le a menetsúrlódási nyomatékot, és indítja meg az orsó forgását. Jobb menetű orsó esetén az ábrán vázolt összeállításnak a teheremelés esete felel meg. A nyomatékegyensúlyt az (1) összefüggés fejezi ki, azaz

$$Dmg = F \frac{d_2}{2} \operatorname{tg}(\rho' + \alpha), \quad (1)$$

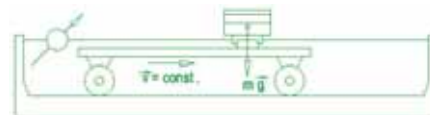
melyből a μ_0 nyugvó súrlódási tényező a d_2 középtátmérő, az α menetemelkedési szög és a β menetprofilszög ismeretében a

$$\mu_0 = \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \operatorname{tg}\left[\operatorname{arctg}\left(\frac{D}{d_2} \cdot \frac{2mg}{F}\right) - \alpha\right] \quad (2)$$

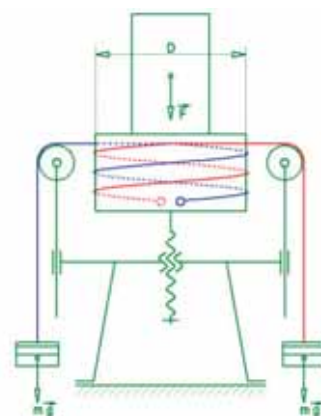
összefüggéssel számítható.



1. ábra Nyugvó súrlódási tényező mérése

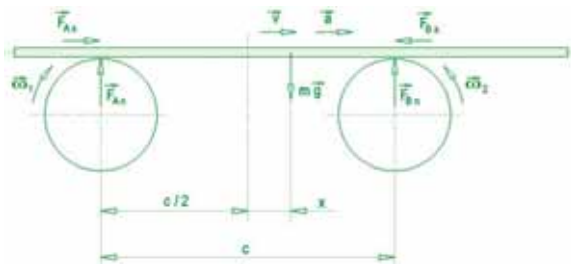


2. ábra Mozgó súrlódási tényező mérése



3. ábra Mozgatóorsó – anya kapcsolat súrlódás mérése [3]

Léteznek egyéb mérési módszerek, ilyen a harmonikus rezgőmozgás elvén működő. Tekintsük a jól ismert elvet, az egymástól c távolságra lévő, egymással szemben forgó tárcsákra helyezett vízszintes helyzetű rúd mozgásviszonyait a 4. ábra segítségével. Az erővektorok a rúdra irányulókat jelölik.



4. ábra Forgó tárcsákra helyezett vízszintes rúd erő és mozgásviszonyai [3]

3. A FELHASZNÁLT MÉRÉSI ELV

A 4. ábra feladatára felírható homogén másodfokú lineáris differenciálegyenlet a tárcsák és a rúd közötti μ súrlódási tényező, a x elmozdulás és idő szerinti differenciáljai, valamint a c tengelytávolság esetén

$$\ddot{x} + \frac{2\mu g}{c}x = 0. \quad (3)$$

ahol az x elmozdulás tényezőjét ω^2 -tel jelölve a megoldás

$$x(t) = \alpha \cos(\omega t) + \beta \sin(\omega t) \quad (4)$$

alakban kereshető. A fenti $x(t)$ valóban megoldása az egyenletnek, ahol a kezdeti feltételekkel ($t=0$ esetén $x(t) = \alpha$ és $\dot{x}(t) = 0$ miatt $\alpha = 0$) a harmonikus rezgőmozgás elmozdulás függvénye

$$x(t) = \alpha \cos(\omega t). \quad (5)$$

A mozgás legnagyobb kitérése (amplitúdója) α , körfrekvenciája pedig

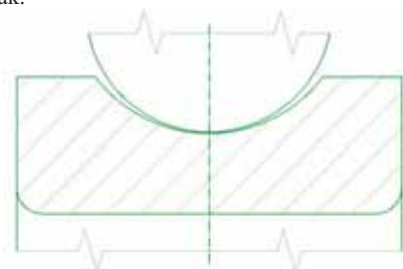
$$\omega = \sqrt{\frac{2\mu g}{c}}. \quad (6)$$

A mozgás T periódusidejének ismeretében a súrlódási tényező

$$\mu = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{c}{2g}. \quad (7)$$

4. A MÉRŐESZKÖZ MEGVALÓSÍTÁSA

Az elvi megoldás gyakorlatba illesztése feltételezi a rezgőmozgást végző vízszintes helyzetű rúd oldalirányú vezetését. Mélyhornyú golyóscsapágy belső gyűrűire helyezett kör keresztmetszetű rúd alkalmas erre, a görbületi viszonyok az 5. ábrán láthatóan a golyóscsapágyéhoz hasonlóak.



5. ábra Mélyhornyú golyóscsapágy görbületi viszonyai

A 6312 jelű csapágy belső gyűrűjén a futópálya főgörbületi sugarai $36,4 \text{ mm}$ és $11,5 \text{ mm}$, a golyók átmérője $22,2 \text{ mm}$. Ezek szerint a legfeljebb 22 mm átmérőjű rúd a $72,8 \text{ mm}$ átmérőjű tárcsákra illeszkedik.

Érdemes a támaszközt növelni a rúd kiegyensúlyozottabb támasztása érdekében. A mérési elv leírásából illetve (7) eredményéből következik, hogy földi körülmények között,

álló forgástengelyű tárcsák esetén a mérés eredménye csak a támaszköztől függ. A tárcsák fordulatszámától független, így azok akár különbözhetnek is egymástól. Száraz súrlódás, kis fordulatszám, normál légköri és hőmérsékleti viszonyok között e megállapítás igazsága valószínűsíthető. Az egyszerűség, továbbá a mérés körülményeinek későbbi kiterjesztése miatt azonban az egymással szemben forgó tárcsák fordulatszámát mindenképpen azonosra választjuk. Négy darab azonos fogszámú fogaskerék sorba kapcsolásával a szélsők egymással ellentétes forgásiránya és azonos fordulatszáma biztosítható [3].



6. ábra A tárcsák elkészült hajtáslánca

A megfelelő irányú behajtás pedig a rúd befelé terelését. A 6. ábrán látható hajtáselrendezésben a 3. fogaskereket az óramutató járásának megfelelően hajtva alakulnak ki az igényelt mozgásviszonyok. A mozgás legnagyobb kitérését a kezdeti feltétel szerint állíthatjuk be $0 < \alpha < c/2$ értékre. A rezgőmozgás könnyebb érzékelése illetve a rúd egyensúlyának biztosítása érdekében nem választhatunk a tartomány széleihez közeli értéket.

Száraz súrlódás esetén a súrlódási tényező értéke a környezeti hőmérséklet és nyomás függvényében a $10^{-1} < \mu < 10^1$ tartományban várható [1]. Legyen ekkor a mozgás periódusideje a $2,5s > T > 0,25s$ tartományban. Ez a periódusidő tartomány a rezgésnek akár szemrevételezéssel történő pontos érzékelését teszi lehetővé. (7) szerint ehhez $c \approx 0,3106 \text{ m}$ tengelytávolság tartozik. A 6. ábrán látható elemi egyenes fogazatú fogaskerekek fogszáma $z = 34$, modulja pedig $m = 3 \text{ mm}$. A két tárcsa tengelytávolsága ezek szerint $c = 3a = 3zm = 306 \text{ mm}$, mely teljesíti az előbbi feltételt.

5. LEHETSÉGES MÉRÉSI KÖRÜLMÉNYEK

A mérőeszköz eredetileg száraz súrlódás esetén képes a csúszó súrlódási tényező meghatározására. A meghajtás módjára érzéketlen, a fordulatszámra és a csapágyazások ellenállására ugyancsak. A súrlódási tényező gyakorlati értékei esetén érvényes, viszonylag nagy periódusidő a légellenállás befolyását is elhanyagolhatóvá teszi. A súrlódási tényezőt csökkentő bármely körülmény (pl. kenés) növeli a T periódusidőt, ami számunkra kedvező.

Száraz súrlódás esetén az alacsony hőmérséklet és a vákuum jelenléte befolyásolja erősebben a csúszó súrlódási tényező értékét. A csúszási sebesség és a görbületi viszonyok hatása nem jelentős. Kent felületek esetén viszont minden olyan egyéb tényezőt is figyelembe kell vennünk, mely a kenési állapotot befolyásolhatja. Ezek közül a legfontosabbak:

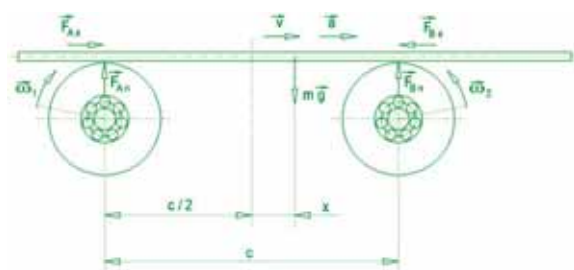
- A kenőanyag halmazállapota
 - o légnemű,
 - o folyékony,
 - o konzisztens,
 - o szilárd,
- A kenőanyag egyéb jellemzői
 - o viszkozitás
 - o konzisztencia
 - o időfüggő reológiai tulajdonságok
- A kenőanyag adalékolása,
- A tárcsa futófelület és a rúd érdessége, mintázata,
- A tárcsa és rúd görbületi viszonyai,
- A tárcsák kerületi sebessége,
- A felületek terhelése,
- Esetleges szilárd felületi bevonatok.

A fenti tényezők egymásra hatása nagyon jelentős, így a vizsgálati lehetőségek igen széleskörűek. A teljesség igénye nélkül említenénk néhány érdekes esetet.

- Igen kis falvastagságú acélcső és igen nagy kerületi sebesség esetén aerodinamikus kenőállapot is kialakulhat a felületek között. Ekkor a súrlódási tényező jóval a $\mu = 10^{-1}$ érték alá csökkenhet, mely a harmonikus rezgőmozgás T periódusidejének jelentős növekedésével jár.
- Folyadéksúrlódás esetén is lényeges a kerületi sebesség, hiszen a súrlódási állapotot a kenőanyag viszkozitása, az érdes felületek legnagyobb kiemelkedése és a felületek terhelése is befolyásolja.
- Zsírkenés esetén, alacsony hőmérsékleten a kenőzsírt képező alapolaj viszkozitásának növekedése mellett a kenőzsír konzisztenciája is növekszik. Időre van szükség a kenőanyag megfelelő eloszlásához, a megfelelő kenőképesség kialakulásához. Amíg a kenési állapot hiányos, a fémfelületek biztonságos elválasztása sem valósul meg.
- Bizonyos lágyfém bevonatok súrlódás csökkentő hatása csak nagyobb terhelés esetén érvényesül [4], ezért ennek kimutatásához meg kell teremteni a terhelés fokozatos növelésének lehetőségét. Legegyszerűbb talán a kellően merev rúdnak a közepén és a végein történő pótlólagos terhelése úgy, hogy a terhelés szimmetriája megmaradjon. A légellenállás nem növekedhet számottevően, ha a csillapítatlan rezgőmozgás feltételeit akarjuk továbbra is biztosítani.

6. A MÉRÉSI ELV KITERJESZTÉSE

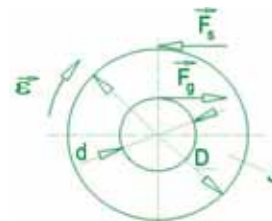
A 4. ábrán bemutatott elv és a 6. ábrán látható kísérleti berendezés feltételezi, hogy a négy azonos fogszámú fogaskerék az első és utolsó tengelyen lévő tárcsák fordulatszámát egyértelműen meghatározza, állandó hajtó fordulatszám esetén a tárcsák és a rezgőmozgást végző rúd között az átlagos csúszási sebesség is állandó lesz. Módosítsuk ezt az elvet, tegyük alkalmassá a mérő berendezést gördülőcsapágyak gördülési ellenállásának mérésére, illetve a kenőanyagok és a környezeti hőmérsékletnek a gördülési ellenállásra gyakorolt hatásának tanulmányozására. A 7. ábra mutatja a módosult elvet.



7. ábra A tárcsákat csak a csapágyellenállás forgatja

Az eredeti feladattal szemben itt csak a csapágyak belső gyűrűit forgatjuk, a csapágy külső gyűrűi és a tárcsák csak a gördülési ellenállás miatt fognak elfordulni. A gördülési ellenállásokat a rúd tömegéből az egyes tárcsákra eső részen kívül a tárcsák tömege is befolyásolja. A tárcsák és a rúd között fellépő súrlódó erő nagyságrendekkel nagyobb, mint a csapágyak gördülési ellenállási tényezője, továbbá jóval nagyobb karon hat a súrlódó erő, mint a gördülési ellenállás, ezért a rúd nem fog megcsúszni a tárcsákon. Ha a rúd gyorsul, akkor a tárcsák szöggyorsulása ezzel egyértelmű kapcsolatba hozható. Az is egyértelműsíthető, hogy a két tárcsa szöggyorsulása nagyság és irány szerint is megegyezik, a tárcsák és a rúd közötti tiszta gördülések miatt. Nem csak a

rúd, hanem a tárcsák is harmonikus mozgást fognak végezni, és várhatóan itt is csillapítatlan lesz a rezgés. Hogy ezt belássuk, írjuk fel a bal oldali tárcsa mozgásegyenletét. Segítségül a 8. ábra szolgál, a d és D átmérők, a J tehetetlenségi nyomaték, a külső nyomatékot adó F_s és F_g kerületi erők és az ε szöggyorsulás feltüntetésével.



8. ábra Adatok a bal oldali tárcsa mozgásegyenletéhez

A rúdról a tárcsára lefelé ható normálerő a 4. ábra x pillanatnyi kitérésű rúdja esetén

$$F_n = \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{c} \right) mg, \quad (8)$$

a csapágygolyókról a külső csapágygyűrűre felfelé ható normálerő pedig a (8)-hoz képest kiegészül a tárcsa és a külső csapágygyűrű együttes $m_t g$ súlyerejével. A külső erők nyomatékai és a gyorsítónyomaték egyenlőségét kifejező egyenlet a bal oldali tárcsa esetén, a 8. ábra jelöléseivel

$$\frac{d}{2} F_g - \frac{D}{2} F_s = J \varepsilon, \quad (9)$$

melyből az F_s súrlódó erő kifejezhető, és ennek az értéke sokkal kisebb, mint 4. ábra feladata esetében. A gördülő ellenállás a kiegészített (8) egyenletből

$$F_g = \mu_g \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{x}{c} \right) mg + m_t g \right]. \quad (10)$$

A x pillanatnyi kitérésű rúd $\ddot{x} = \varepsilon D/2$ pillanatnyi gyorsulásával és a (10) egyenletet (9)-be történő behelyettesítésével a tárcsa kerületén ható súrlódó erő

$$F_s = \frac{d}{D} \mu_g g \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{x}{c} \right) m + m_t \right] - \frac{2}{D} J \varepsilon \quad (11)$$

alakban nyerhető. A jobboldali tárcsára a súrlódó erő kifejezése ehhez hasonló, az említett azonos irányú és nagyságú szöggyorsulás miatt, de képletben minden előjel pozitív. A vízszintes rúd mozgásegyenletét a vízszintes rúdra felírt Newton II. törvénye adja, és a (3) alakhoz hasonló

$$\ddot{x} + \frac{\frac{d}{D} 2 \mu_g g}{1 + \frac{8J}{D^2 m}} x = 0 \quad (12)$$

homogén másodrendű differenciálegyenlet lesz.

Az egyenletben az előző egyszerűbb esettől eltérően szerepel még a rúd m tömege, a tárcsák tehetetlenségi nyomatéka és a tárcsák átmérői. A tárcsák tehetetlenségi nyomatékába bele kell érteni a vizsgált golyóscsapágy külső gyűrűjének tehetetlenségi nyomatékát is.

A harmonikus rezgőmozgás T periódusideje itt is mérhető, így a rezgés körfrekvenciája, $\omega = 2\pi/T$ szerint számolható. Végül a csapágy gördülési ellenállási tényezője

$$\mu_g = \frac{D}{d} \left(1 + \frac{8J}{D^2 m} \right) \omega^2 \frac{c}{2g}. \quad (13)$$

A számításban az egyedüli bizonytalanságot a tárcsák és a vizsgált golyóscsapágy külsőgyűrű együttes tehetetlenségi nyomatékának meghatározása okozza.

7. A FELHASZNÁLT MÉRÉSI ELV GYAKORLATI ALKALMAZÁSA

A 6. ábrán bemutatott elemek a 4. ábra elvi megoldását követve változó fordulatszám és változó terhelés mellett képes egymással pontszerűen érintkező henger és gyűrűfelület között kialakuló súrlódás vizsgálatára.

A később ismertetendő legnagyobb beállítható terhelés alapján számolt Hertz-féle feszültség a 4. ábra csapágygyűrűje és a 22mm átmérőjű hengeres rúd érintkezésében jóval alatta marad a gyakorlati értékeknek a $\sim 320\text{MPa}$ értékével.

A súrlódási tényező mérése kenés nélküli és különböző kenőanyagokkal, elsősorban kenőzsírral kent acélfelületek között lehetséges. A kenőanyagok a felületekre juttatása és eltávolítása egyszerűen, gyorsan elvégezhető. A kenőanyag fajtájának szabad megválasztását a terhelés és hőmérséklet korlátozza, a merülő olajkenés pedig zárt hajtóműházat igényel.

A tárcsák gyűrűfelülete keményre edzett krómaccél anyagú (csapágygyűrűből készült), a hengerfelület anyag- és felületminősége a hidegen húzott normalizált ötvözetlen szerszámacéltól az edzett kőszőrült ötvözött acélig terjedhet. A terhelés növelése a henger végein szimmetrikusan elhelyezett tömegekkel lehetséges. A tömegek nagyságát a tengelyek megengedett lehajlásának szokásos mértéke korlátozza. Legyen ez az érték a 22 mm átmérőjű, 900 mm hosszú hengeres acélrúd esetén $y_{meg} = 0.3\text{mm}$, melyhez a támaszköz ismeretében a konzolok terhelése a végeken legfeljebb egy-egy 3kg-os tömeggel történhet, a majdnem 3kg-os saját tömegen felül.

A terhelés csökkentése 1mm falvastagságú hidegen vont precíziós acélső választásával lehetséges, ez esetben a saját tömeg 0,5kg alatt lesz, ezért lágyabb kenőzsírok, kisebb viszkozitású kenőolajok vizsgálata is lehetővé válik.

A vizsgálat környezeti hőmérséklete a megengedett határon belül a mérés pontosságát nem rontja, így alacsonyabb hőmérsékleti tartományokban is lehetőség van a kenőanyag által okozott kenőképesség romlás kimutatására.

A 7. ábrával bevezetett elv szerint gördülőcsapágyak gördülési ellenállása vizsgálható. A mérés gyakorlati kivitelezése még további megfontolásokat igényel, mivel meg kell oldani a vizsgált kenőanyaggal ellátott csapágy könnyű és gyors behelyezését a mérő berendezésbe.

8. A MÉRŐESZKÖZ TOVÁBBI FELADATAI

A tárcsák forgatását változtatható fordulatszámú villamos motorral végezzük. Nagymértékű csúszási sebesség változtatás igénye esetén a villamos motor és hajtómű egységének cseréje is megoldható.

A tárcsák megtett körülfordulásainak számát mechanikus fordulatszámoló vagy induktív jeladó és összegző segítségével végezhetjük.

A rúd által megtett teljes rezgések számát ugyancsak induktív jeladó, vevő és összegző által mérhetjük. A mágneses jeladót a rúd közepére erősítjük, a vevő fejet pedig az állványhoz rögzítjük. A vizsgálat t idejének mérését is az összegző végzi. A vevővel összekötött összegző az egyensúlyi helyzetben való N áthaladásokat számlálja. A T periódusidő az előbbieket hányadosának kétszerese, azaz $T = 2t/N$.

9. ÖSSZEGZÉS

Egy jól ismert csúszó súrlódás mérési elv tanulmányozása útján a szerzőnek sikerült olyan eszköz működésének elvi alapjait tisztázni, mely képes egy tetszőleges típusú kenőzsírral feltöltött, adott méretű golyócsapágy gördülési ellenállásának vizsgálatára beállítható üzemi hőmérséklet mellett, és ezzel az adott kenőzsír egy bizonyos képességének kimutatására.

10. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

"A cikkben/előadásban/tanulmányban ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg"

"The described article/presentation/study was carried out as part of the EFOP-3.6.1-16-2016-00011 "Younger and Renewing University – Innovative Knowledge City – institutional development of the University of Miskolc aiming at intelligent specialisation" project implemented in the framework of the Széchenyi 2020 program. The realization of this project is supported by the European Union, co-financed by the European Social Fund."

11. IRODALOM

- [1] Bowden, F.P. and Tabor, D. "The Friction and Lubrication of Solids. Part I", publ. Oxford, Oxford University Press, 1950.
- [2] Balogh, T.: Érintkező felületek száraz súrlódásakor lejátszódó folyamatok numerikus és kísérleti vizsgálata, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2007.
- [3] Oulsnam, S.R., & B.G. Brothers, Engineering Laboratory Work, Part 1, Applied Mechanics S.3, Cleaver-Hume Press Limited, London, 1960. p38-44.
- [4] Valasek I., Auer J., Kenőanyagok és vizsgálataik, Tribotechnik Kft., Budapest, 2003. p54-55.

TPM vs. INDUSTRIE 4.0 – ANOMALIE ODER POTENTIAL?

Suriné Lengyel Veronika, Institutsingenieur, Prozessberater, vera.suri@srladvantage.hu

INHALT

Im Laufe unserer Zusammenarbeit mit Roto Elzett Certa GmbH haben wir uns an mehreren Projekten beteiligt, wo innovative Maßnahmen eingeführt wurden, die später zur Verleihung des Titels „Musterbetrieb“ führten. Am Beispiel von Roto möchten wir der Frage nachgehen, ob die Verbindung von Industrie 4.0 und TPM (Total Productive Maintenance) als Anomalie oder Potenzial betrachtet werden soll.

1. EINLEITUNG

Im Jahr 2011 wurden wir mit der Umsetzung des TPM-Implementierungsprojekts beauftragt, welches volumenmäßig zu unseren bisher größten Projekten gehörte. Damals wussten wir noch nicht, dass wir mit diesem Projekt einen Meilenstein setzten, nicht nur was das Volumen angeht, sondern auch was dessen Bedeutung angeht. Es ist uns während des Projektverlaufs richtig bewusst geworden, dass die organisierte Instandhaltung, ähnlich wie ein TPM-System eine sehr komplexe Aufgabe darstellt, und sich auf das gesamte Unternehmen auswirkt.

2. ÜBER ROTO

Roto Elzett Certa GmbH ist eine Tochtergesellschaft der Roto Frank AG mit Sitz in Leinfelden. Das Hauptprofil des Unternehmens ist die Fertigung von Fensterbeschlägen. Die Materialbearbeitung fängt an den Hochleistungspressen an, dieser Fertigungsprozess ist für die Qualität des Produkts ausschlaggebend, hier müssen die Lagerbestände optimiert werden, deshalb gilt dieser Prozess bei jedem Projekt als erster Bezugspunkt.

Heute, wo im produzierenden Gewerbe Digitalisierung und Automatisierung als absolute Priorität gelten, bewarb sich das Unternehmen stolz um den Titel „Musterbetrieb“, und mit dieser Auszeichnung wurde Roto zu den fünf bekanntesten Unternehmen Ungarns gekürt.

Roto betrachtet Kontinuität, Erfolg und Zuverlässigkeit als wichtigste Werte eines Unternehmens. Man ist überzeugt, dass das Unternehmen mittlerweile in der Lage ist, das während der Jahre angehäuften Wissen jedem Unternehmen weiterzugeben, das entschlossen ist, sich weiter zu entwickeln.

3. EINFÜHRUNG DES TPM

"In unserem ersten TPM-Projekt wussten wir nicht, dass die größte Herausforderung bei dieser Philosophie die Änderung der Denkweise darstellt. Zuerst die der Führungskräfte, dann die der Mitarbeiter. "[1]

Neben den ungeplanten Maschinenstillständen ist bei vielen Unternehmen auch ein häufiges Problem, dass diese Fehler die Mitglieder des Instandhaltungsteams zu Erfolgen verhelfen. Das heißt, je effizienter und schneller die Maschinenfehler behoben werden, desto größer ist das Erfolgserlebnis des Instandhaltungsteams. Parallel damit wollten sie kein TPM – natürlich.

Dieses Projekt dauerte 9 Monate lang, bis wir schließlich das TPM-System, und die autonomen Instandhaltungsaufgaben ausgearbeitet haben.

Um nicht sofortige Fehler zu melden, haben wir ein Work-Flow-System mit Lotus Notes entwickelt, welches in der Fachliteratur wegen der Form der Karte als T-Karten-System genannt wird. Gleichzeitig wurde die Funktionsverfolgung gestartet, es wurde die Messung und Auswertung des OEE-Indikators eingeführt. OEE (Overall Equipment Effectiveness) ist eigentlich ein KPI, das anhand von Elementen aus verschiedenen Bereichen des Unternehmens zeigt, wie effizient die Anlage funktioniert.

$$OEE = A \times P \times Q,$$

A - Verfügbarkeit
P - Geschwindigkeit
Q - Qualität

4. INDUSTRIE 4.0 ERHEBUNG

Bevor wir zur Erläuterung des Titels kommen, soll hier eine gemeinsame Forschungsarbeit mit dem Institut für Maschinenkunde an der Fakultät für Holzwissenschaft der Universität Sopron präsentiert werden.

4.1. Industrie 4.0

Industrie 4.0 ist anders formuliert Digitalisierung und Automatisierung während des Materialflusses. Die Grundlage dafür ist die Algorithmisierbarkeit. Das heißt, die Prozesse können und sollten automatisiert werden, die man mit Algorithmen beschreiben kann. Die

Voraussetzung dafür ist eine prozessorientierte Organisation.

4.2. Kurze Zusammenfassung der Forschungsarbeit

"In der I4.0-Studie haben wir uns zum Ziel gesetzt, eine Methode zu entwickeln, um die I4.0-Reife eines Unternehmens schnell bewerten zu können, und dem Unternehmen rasch Hinweise zu geben, wo die verfügbaren Industrie 4.0 Szenarien am effizientesten eingesetzt werden könnten." [3]

Während der Erhebung wurden Möglichkeiten zur Anwendung neuer, sogenannter "Cyber-Physical"-Systeme identifiziert, die im Vergleich zum heutigen Level eine viel detailliertere und genauere Intelligenz, Fernüberwachung, Fehlertoleranz und Optimierung bieten.

4.3. Methodik

"Für die Bewertung der I4.0-Reife wurde ein Fragebogen zur Identifizierung des Entwicklungspotenzials verwendet, um das Unternehmen bezüglich Digitalisierungsgrad zu positionieren. Die Bewertung soll anhand der folgenden Kategorien erfolgen: " [3]

- Produkt
- Maschinen / Fertigungstechnik
- Produktionsprozesse
- Unternehmensprozesse
- Strategische Führung

Bei dem Fragebogen handelt es sich um eine Grading-Umfrage, bei der die einzelnen Antworten vorliegen müssen, bevor eine Antwort mit einer höheren Punktzahl belohnt wird. So haben wir das Toolbox von Industrie 4.0 entwickelt.

5. ERGEBNISSE DER UMFRAGE

Der Fragebogen wurde von Roto Elzett Certa Kft. ausgefüllt. Wegen der Beziehung zwischen TPM und Industrie 4.0 versprach der Vergleich der Ergebnisse mit dem Status des TPM-Projekts zum Zeitpunkt der Einführung interessante Erkenntnisse. Daher wurde ausnahmsweise eine Rückwärtsbewertung durchgeführt. Dabei unterstützten uns die Mitarbeiter, die schon 2011 bei der Firma gearbeitet haben. Bild 1. zeigt die für die Wartung relevanten Kriterien und die dazu gehörenden Ergebnisse von 2011 und 2018.

Bei dem Unternehmen gab es schon 2011 seriöse Lösungen, die damals noch nicht Industrie 4.0 hießen. Produktidentifikation,

Lösungen zur Reduzierung der Umweltbelastung waren in Ordnung.

Bild 1. zeigt allerdings, dass im Instandhaltungsbereich 2011 der Entwicklungsbedarf vorlag.

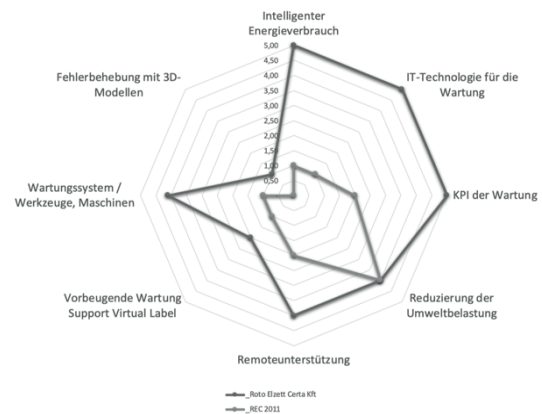


Bild 1. Vergleich der Forschungsergebnisse 2012 vs. 2018 [3]

6. ENTWICKLUNG DER MASCHINEN-AUSFÄLLE

6.1. Einführung

Bis 2012 ist es uns gelungen, das automatische Datenerfassungssystem aufzubauen. Dieses wurde damals noch nicht als Industrie 4.0-Lösung genannt, heute würden wir die ausgearbeitete Produktionsdatenerfassungs- und Visualisierungslösung eindeutig als MES (Manufacturing Execution System) definieren.

Mit der Datenerfassung wurde im Juli 2012 begonnen, dabei wurden unter anderem die geplanten Maschinenstillstände, die Maschinen- und Werkzeugausfälle und die Qualitätsfehler identifiziert. Das folgende Bild zeigt die Entwicklung der Ausfallzeit durch Maschinenfehler im Vergleich zur gesamten Laufzeit.

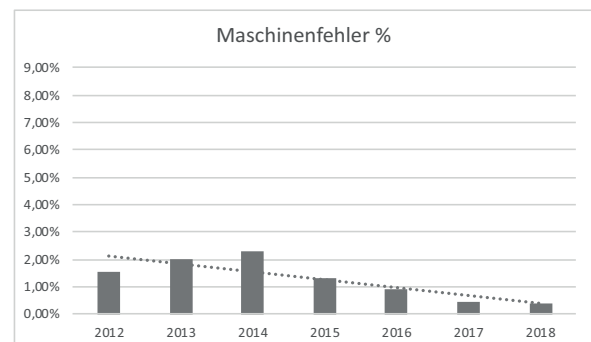


Bild 2. Maschinenfehler in % [4]

In der ersten Phase nach der Einführung wurde an der Justierung des Datenzugriffs gearbeitet. Während dieser Zeit wurden in der Firma mehrere wichtige Entwicklungsmaßnahmen durchgeführt, die diesem Zweck dienten. Es ging nicht nur und in erster Linie nicht darum, Daten zu reparieren, sondern, dass die Daten möglichst zuverlässig und genau werden, und möglichst viele Anlagen dem Datenerfassungssystem angeschlossen werden:

2012:

- Programmierung von OEE Datenerfassungsflächen auf Maschinen, Erstellung von Auswertungsprogrammen
- Senden von Fehlermeldungen vom Bedienpanel der Fertigungsanlagen aus per E-Mail, Smartphone direkt an die Werkstatt
- Aufnahme der Stillstandsstatistik vom Vortag in die Tagesordnung der Shopfloor-Besprechungen am nächsten Tag → Maßnahmen

2013:

- Neues Layout für die Werkstatthalle, rationellere Gestaltung
- Beschaffung, Systematisierung und Auffüllen von Ersatzteilboxen in der Werkstatthalle
- Gewährleistung der SAP-Kompatibilität der Ersatzteile
- Aktivierung, Inbetriebnahme, Upload des SAP PM-Moduls
- Planung von Wartungszyklen gemäß SAP

Wie auf Bild 1 zu entnehmen ist, nahm der Anteil der Maschinenstillstände in diesem Zeitraum zu, die Erfassung und Identifizierung der Daten erreichte den heutigen Stand, und die Mitarbeiter haben gelernt, die Fehler zu identifizieren.

6.2. Zeit der kontinuierlichen Verbesserungen

Bei Roto wird Prozessmanagement und Lean seit vielen Jahren eine besonders wichtige Rolle beigemessen. RPS (Roto Produktion System), dessen wichtiger Bestandteil die kontinuierliche Verbesserung darstellt, wurde eingeführt. Nach den ersten TPM-Erfolgen wurde das gleiche Ziel gesetzt. Diese Entwicklungen führten einerseits zu einer Optimalisierung, andererseits entstanden dadurch seriöse Industrie 4.0 Lösungen.

Daraus ergibt sich die Verbesserung, die Roto in den letzten Jahren aufweisen kann, und was auf der Abbildung 2 – ab dem Jahr 2014 – zu sehen ist, nämlich der deutliche Rückgang der Maschinenstillstände.

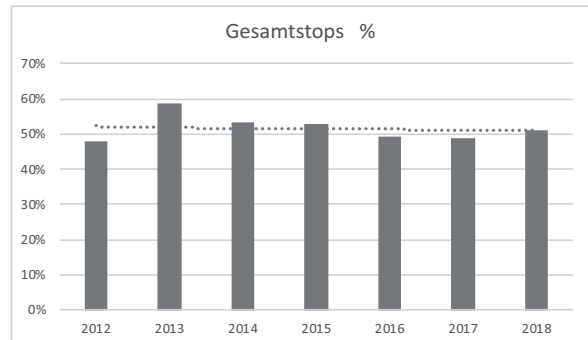


Bild 3. Gesamtstops in % [4]

Um die Möglichkeit auszuschließen, dass Maschinenfehler nur aufgrund der genaueren Fehlererkennung reduziert wurden, haben wir auch alle Fehler analysiert (Bild 3.).

Da 2018 noch nicht als relevant angesehen werden kann, können wir feststellen, dass die Daten ein sehr ähnliches Muster zeigen. Obwohl in den ersten Jahren tatsächlich die Qualitätsverbesserung der Daten zum Ziel gesetzt wurde, wurde in den darauffolgenden Jahren das primäre Ziel definiert, die Maschinenstillstände zu reduzieren. Und das mit sehenswertem Ergebnis. Man muss hier bemerken, in der Summe alle Stillstandsgrund inbegriffen sind, auch geplante Stops.

Die eingeführten technischen und technologischen Lösungen im Überblick:

2014:

- Umtausch der Schwammrollen auf Hartplastikrollen. Die Nutzungsdauer der Rollen beträgt 2 Jahre, statt wie früher Austausch der Rollen wöchentlich 1-2-mal.

2015:

- Zentralschmierung (Öl schleppen und in die Pressen füllen sind nicht mehr notwendig, die Schmiermittelmenge lässt sich berechnen)

6.3. Industrie 4.0-Verbesserungen

Die Kaizen-Projekte und die Entwicklung des Prozesses haben das erwartete Ergebnis gebracht, mit I4.0-Elementen.

2014:

- Trennung des T-Karten-Systems von Lotus Notes (für jeden verfügbar)

2015:

- Verbindung des T-Karten-Systems mit SAP (Messung von Reaktionszeit sowie Arbeitszeit und Materialverbrauch können nach Maschinen einzeln gebucht und ausgewertet werden.)

7. ENTWICKLUNG DER WERKZEUGFEHLER

Nach der erfolgreichen Einführung von TPM im Produktionsbereich entstand der Bedarf, auch die Servicebereiche in den Prozess einzubinden. Ein solcher Bereich war u.a. die Werkstatt für die Wartung von Stanzwerkzeugen. Ziel war es natürlich, die Maschinen der Werkzeugwerkstatt zu überwachen, aber es war noch wichtiger, ihre Rolle in der Belieferung der Produktion zu analysieren.

Aus diesem Grund soll die Entwicklung der Maschinenstillstände durch Werkzeugfehler von 2012 bis 2018 präsentiert werden.

7.1. Einführungsphase:

Bei der Analyse der Werkzeugfehler ist der Trend noch markanter. Auch hier lässt sich generell feststellen, dass die erste Phase die Zeit der Datenverbesserung ist.

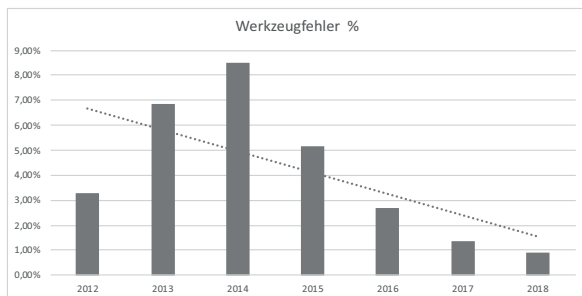


Bild 4. Werkzeugfehler in % [4]

Hier wird vor allem auf die Prozesse fokussiert. Die Einführung hier erfolgte Ende 2012, nach dem TPM-Projekt.

2012:

- Gestaltung eines neuen Werkzeugwartungsprozesses
- Zu den Arbeitsplätzen definierte Aufgaben
- Werkzeugbeförderungen mit Wagen

7.2. Phase der kontinuierlichen Verbesserungen

Ab 2013 begann auch ein Projekt zur Verbesserung der Daten, wo nach der Klärung des Prozessablaufs die Prozessverluste unter die Lupe genommen wurden. Es wurde definiert, dass bei der Bedienung der Maschinen die Geschwindigkeit erste Priorität hat, deshalb wurden weitere Prozessverbesserungen eingeführt:

2014:

- Einrichtung eines Ersatzteillagers
- Getrennte Handhabung von Schnellreparatur

- Reparatur von Großwerkzeugen an einem separaten Arbeitsplatz

7.3. Phase Industrie 4.0

Der Werkzeugbetrieb ist ein besonders kostenaufwendiger Bereich im Unternehmen, deshalb hat hier jede Entwicklung ein hohes Potential. Kein Zufall also, dass es hier am meisten notwendig war, Industrie 4.0-Elemente zu integrieren.

2015:

- Terminals an den Arbeitsplätzen
- Start des Werkzeugverfolgungssystems
- Ausbau eines Rohrpostsystems
- Autodidaktisches Werkzeugverfolgungssystem
- Wartungsplan basierend auf den ausgewerteten Daten

2016-18

- QKL (Qualität, Kosten, Lieferservice) System in Echtzeit basierend auf Echtzeitdaten
- Transparenz des täglichen Ersatzteilverbrauchs
- Überwachung der meistverwendeten Ersatzteile

8. TPM vs. IPAR 4.0

Aufgrund der vorangegangenen Abschnitte lässt sich zusammenfassend feststellen, dass das TPM-System und die Industrie-4.0-Denkweise aufeinander aufbauen und einander ergänzen. Wo Prozesse, in diesem Fall die Prozesse des Instandhaltungssystems, in Ordnung sind, können die Industrie 4.0-Lösungen kommen. So können die Anomalien aufgelöst werden, denn die Annahme, dass es sich bei TPM und I4.0 um völlig entgegengesetzte Richtungen handelt, kann aus dem Weg geräumt werden. Mit diesem Beitrag wollten wir aufzeigen, dass Industrie 4.0 auch im Bereich der Instandhaltung eine Möglichkeit darstellt.

BCG (Boston Consulting Group) führte im Dezember 2017 eine Erhebung durch, mit ähnlichem Ergebnis [2]. BCG analysierte bei dieser globalen Umfrage, bei der Führungskräfte großer Industrieunternehmen befragt wurden, den Zusammenhang zwischen Lean und Industrie 4.0. Die aufgrund einer Zusammenfassung des Forschungsprojekts von BCG angefertigte Abbildung 5 zeigt die Vorteile von Lean und Industrie 4.0 bei separater und gemeinsamer Anwendung.

Aufgrund von Betriebserhebungen stellten wir fest, dass TPM – obwohl es sich dabei im engen Sinne um kein echtes Lean-Tool handelt –, als eine Lean-Lösung zu betrachten

ist, davon sind wir in diesem Beitrag auch ausgegangen.

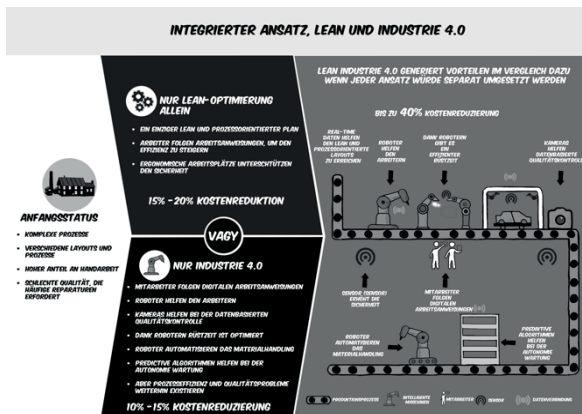


Bild 5. Beziehung Lean und Industrie 4.0 [2]

Wir möchten uns bei der Roto Elzett Certa GmbH für die Bereitstellung der Entwicklungsdaten bedanken. Unser Dank gilt auch den Kollegen, die uns bei der Zusammenstellung des Materials behilflich waren.

9. FOTOS, BILDER

Bild 1. Vergleich der Forschungsergebnisse 2012 vs. 2018

Bild 2. Maschinenfehler im Vergleich zur gesamten Laufzeit

Bild 3. Gesamtstops in %

Bild 4. Werkzeugfehler in %

Bild 5. Beziehung Lean und Industrie 4.0

10. LITERATUR

[1] Suri Vera: Die Zeit der Superhelden ist vorbei - Prozessentwicklung in der Praxis - Konferenz BME (2015)

[2] Boston Consulting Group – When Lean Meets Industry 4.0 – Studie

[3] János Suri, Veronika Suriné Lengyel: Machbarkeitsstudie über die Einführung von Industrie 4.0 bei Holzverarbeitenden Unternehmen – Zusammenfassung

[4] Roto Elzett Certa GmbH – Betriebsinterne Unterlagen

OPTIMUMKERESŐ ALGORITMUSOK ITERÁCIÓTÖRTÉNETÉNEK VIZSGÁLATA

ITERATION HISTORY ANALYSIS OF EVOLUTIONARY TYPE OPTIMIZATION ALGORITHMS

*Dr. Szabó Ferenc János, PhD, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet,
machszf@uni-miskolc.hu*

ABSTRACT The iteration history curve of optimization algorithms is a saturation- type development curve or sigmoid shape curve. The iteration history curve of the RVA (Random Virus Algorithm) is analyzed in order to find its best settings to a given optimization problem. The analysis of the characteristics and numerical parameters of the iteration history curve gives the possibility to discover the speed and efficiency of the algorithm without the necessity to wait the whole running until its final result, which can make faster the numerical experiments during the solution of the optimization problem and „fine tuning” the algorithm to the given task. Since sigmoid type curves can be found in many different fields of the life (history of the sport world records, comparison of the achievements of several groups), the results of this analysis can be used in several different domains of the life, when the ranking, comparison, evaluation or qualification of several individuals or groups is important.

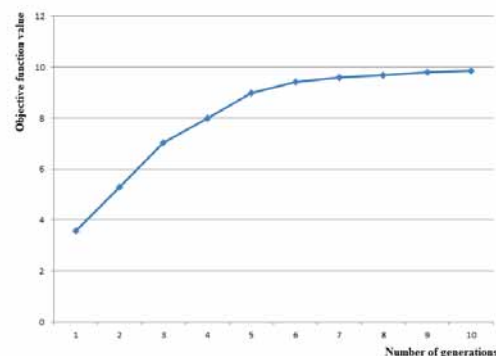
1. BEVEZETÉS

Mivel a cikket nyomdakész állapotban kell Az optimumkereső algoritmusok iteráció történetét mutató görbék minden esetben telítődési (szigmoid) típusú görbék, melyeknek az egyenlete különböző, a görbék alakjával, növekedési sebességével, az elérhető szélsőérték nagyságával kapcsolatos paramétereket tartalmaz. Egy optimumkereső algoritmus teljes keresési folyamata, főleg napjainkban, a multidiszciplináris optimálás [1][2][3][4][5] korszakában, sok időt vesz igénybe. Az időigényes számítások megspórolása, csökkentése miatt újabb és újabb algoritmusok kerülnek kifejlesztésre [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12][13]. Az így kifejlesztett algoritmusok egyre szélesebb körben kerülnek alkalmazásra a mérnöki optimálás [14][15][16][17] különböző területein is. Az algoritmus különböző paramétereinek értékeit „behangolni” többszöri

futtatásokat, kísérletezéseket tesz szükségessé, így a hangolási, optimumkeresési folyamat heteket is igénybe vehet. Az iteráció történeti görbének néhány pontból történő approximációja alapján előállítva az iteráció történeti görbét, gyorsabbá és hatékonyabbá tehető ez a hangolási, kísérletezési folyamat, akár a teljes idő felére csökkenthető. Jelen munkában erre szeretnénk egy példát bemutatni, az RVA (Random Virus Algorithm) [4] optimumkereső algoritmust alkalmazva.

2. AZ ITERÁCIÓTÖRTÉNET GÖRBÉJE

Az 1. ábra egy jellemző iterácótörténeti görbét mutat, mely minden optimumkereső algoritmus működésének jellemző görbéje. A görbe telítődési jellege a keresés „finomodásával” magyarázható, minél hosszabban keresünk, a keresés vége felé egyre nehezebb lesz az addig megtaláltaknál jobb pontot találni.



1. ábra. Egy jellemző iterácótörténeti görbe

A gazdasági, mérnöki, egészségügyi és tudományos élet számos területén találkozhatunk szigmoid típusú görbék alkalmazásával különböző jelenségek leírására [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24]. Jelen cikkben két jellegzetes görbét, a Pearl- Reed [21] és a Bertalanffy [22] görbét fogjuk használni az algoritmus iteráció görbéjének leírására. A görbe közelítésének

numerikus megoldásához a Nelder- Mead optimáló algoritmust is felhasználjuk.

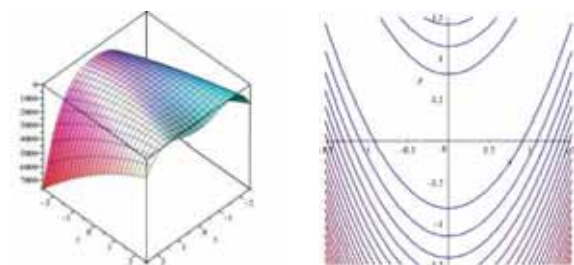
3. DEMONSTRÁCIÓS SZÁMPÉLDA

Az iterációtörténeti görbe tanulmányozásához a Rosenbrock- függvény [26] maximumának keresési folyamatát fogjuk bemutatni. Az optimumkeresés célfüggvénye tehát:

$$f(x, y) = 10 - (1 - x)^2 - 100(y - x^2)^2 \quad (7)$$

a változókra felírt explicit feltételek : $-2.5 \leq x \leq 2.5$ és $-2.5 \leq y \leq 2.5$,
implicit feltétel: $x^2 + y^2 \leq 2$.

A célfüggvény kontúros ábrázolása a 2. ábra a és b részében látható.



a. A függvény alakja

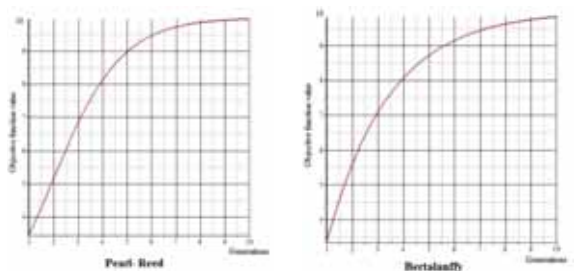
b. A kontúros kép

2. ábra

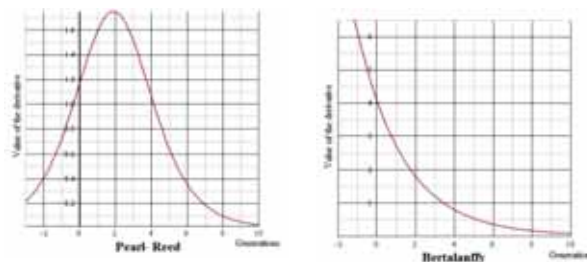
A maximumkeresési probléma megoldása: a függvény $x = 1$ és $y = 1$ esetén a maximális 10 értéket veszi fel. Az RVA algoritmus iterációtörténeti görbéjének (1. ábra) közelítése során adódó egyenletek:

Pearl- Reed : $y = \frac{K}{1 + ce^{-rx}}$, $K = 10$, $r = 0.7$,
 $c = 3.8$, regressziós együttható: -0.99183 .

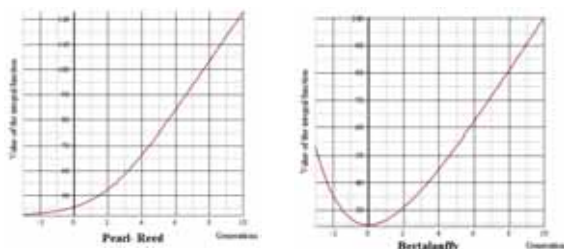
Bertalanffy: $y = K(1 - ce^{-rx})$, $K = 10$,
 $r = 0.41$, $c = 1$, regressziós együttható: -0.99607 .



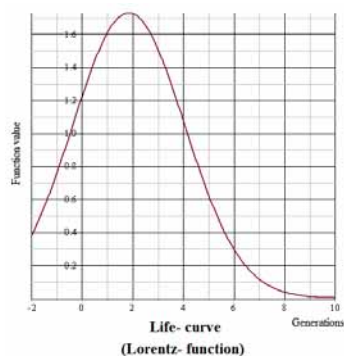
3. ábra. Az iteráció történeti görbét közelítő görbék



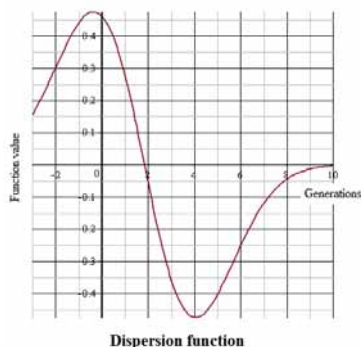
4. ábra. A közelítő görbék deriváltjai



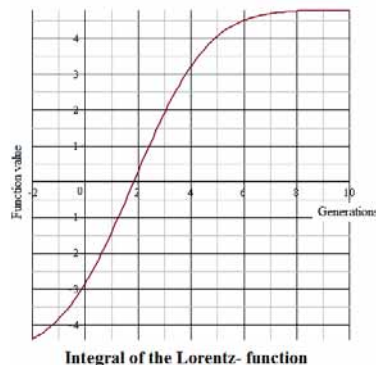
5. ábra. A görbék integrálja



6. ábra. A Lorentz- függvény



7. ábra. A diszperziós függvény



8. ábra. A Lorentz- függvény integrálja

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Az iterációtörténeti görbe közelítése után felírható a görbe egyenlete, képezhető a deriváltja és integrálja. Az ezekben az egyenletekben szereplő paraméterek szám szerint leírják a görbe meredekségét, ami az algoritmus gyorsaságát mutatja, valamint az elérhető szélsőértékre is jó becslést adnak. Ezeket összehasonlítva nem kell megvárni az optimumkeresési programfutás végét, hanem már 3-4 iteráció után közelíthető az iteráció történet és a paraméterek összehasonlításából eldönthető, hogy az adott beállítások az algoritmus mennyire hatékony munkáját eredményezik, ezáltal jelentősen csökkenthető az algoritmusok beállítási, numerikus kísérletezési munkájának ideje.

5. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A cikkben bemutatott kutatómunka megvalósulását a következő projekt támogatása segítette: EFOP-3.6.1-16-2016-00011 "Younger and Renewing University – Innovative Knowledge City – institutional development of the University of Miskolc aiming at intelligent specialisation" a Szechenyi 2020 program keretében. A projekt megvalósulását az Európai Unió támogatta, az European Social Fund társfinanszírozásával

A szerző ezúton kívánja köszönetét kifejezni az említett projektnek és szervezeteknek a munka megvalósítása során nyújtott segítségért.

6. IRODALOM

- [1] Abraham, et al.: *Foundations of Computational Intelligence*, Vol. 3. Springer, 2009. 528 p. ISBN 978-3-642-01085-9
- [2] Cramer, E.J., Dennis Jr., J.E., Frank, P.D., Lewis, R.M., and Shubin, G.R., *Problem Formulation for Multidisciplinary Optimization*, SIAM J. Optim., 4 (4): 754-776, 1994.
- [3] Martins, J. R. R. A. and Lambe, A. B., "[Multidisciplinary design optimization: A Survey of architectures](#)", AIAA Journal, 51(9), 2013. DOI: [10.2514/1.J051895](#)
- [4] Szabó, F. J.: Multidisciplinary optimization of a structure with temperature dependent material characteristics, subjected to impact loading. *International Review of*

Mechanical Engineering, 2 (3) pp. 499- 505. (2008).

- [5] Vanderplaats, G. N., *Multidiscipline Design Optimization*, Vanderplaat R&D, Inc., 2007.
- [6] Das, S. et al.: On Stability of the Chemotactic Dynamics in Bacterial Foraging Optimization Algorithm. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Part A.: Systems and Humans*, Vol. 39. Issue 3. pp. 670-679. 2009. ISSN: 1083-4427. DOI: 10.1109/TSMCA.2008.2011474.
- [7] Deb, K. "Current trends in evolutionary multi-objective optimization", *Int. J. Simul. Multi. Design Optim.*, 1 1 (2007) 1-8.
- [8] Eberhart, R., Kennedy, J.: New Optimizer Using Particle Swarm Theory. In: *Proceedings of VI. International Symposium on Micro Machine Human Science* 1995. pp. 39- 43.
- [9] Fogel, L. J.: *Intelligence through Simulated Evolution: Forty Years of Evolutionary Programming*, John Wiley, Chichester, 1999.
- [10] Gao, F. et al.: Virus- Evolutionary Particle Swarm Optimization Algorithm. In: L. Jiao et al.: *ICNC 2006, Part II., LNCS 4222*, pp. 156- 165, 2006. Springer- Verlag, Berlin- Heidelberg, 2006.
- [11] Goldberg, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison- Wesley, Massachusetts, USA, 1989.
- [12] Martens, D. et al.: Classification with Ant Colony Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 11. No. 5. pp. 651-665, 2007.
- [13] Sheel, A.: *Betrag zur Theorie der Evolutionsstrategie*. Dissertation, TU Berlin (In German), Germany, 1985.

- [14] Herskovits, J., Mappa, P., Goulart, E., Mota Soares, C. M. : Mathematical Programming Models and Algorithms for Engineering Design Optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 194, Issues 30- 33, 12th of August, 2005., pp. 3244- 3268.
- [15] Pang, X. P., Chen, J., Wang, J. X., Hou, Y. : Parametric and Controllable Shape Model of the Water- Lubricated Rubber Journal Bearing. *Advanced Materials Research*, Vol. 455- 456, pp. 1468- 1473. Doi: 10.428/www.scientific.net/AMR.455-456.1468 , January, 2012.
- [16] Zhang, Z. Q., Zhou, J. X., Zhou, N., Wang, X. M., Zhang, L. : Shape Optimization Using Reproducing Kernel Practice Method and an Enriched Genetic Algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 194, Issues 39- 41, Oct. 2005. pp. 4048- 4070. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2004.10.004>
- [17] Szabó, F. J.: Edge Shape Optimization of Finite Width Sliding Bearings. *Comput. Sci. Appl.*, Vol. 2., No 1. 2015. pp.29- 35. USA. ISSN: 2333-9071.
- [18] Törnquist, L. 1981. Collected scientific papers of Leo Törnquist. Research Institute of the Finnish Economy. Series A. ISBN 978-951-9205-74-8, 1981.
- [19] Törnquist, L. 1936. The Bank of Finland's Consumption Price Index. *Bank of Finland Monthly Bulletin*, 10, 1-8.
- [20] Mitscherlich, E. A. 1909.: The law of minimum and the law of diminishing soil productivity. (In german). *Landwirtschaftliche Jahrbücher*, 38., pp. 537-552.
- [21] Pearl, R.; Reed, L. J. 1920. On the Rate of Growth of the Population of the United States since 1790 and its Mathematical Representation. *Proc. of the National Academy of Sciences*. Vol. 6. No 6. pp. 275-288.
- [22] Bertalanffy, L. 1960. Principles of Theory of Growth. In: *Fundamental Aspects of Normal and Malignant Growth*. Amsterdam. pp. 137-259.
- [23] Lorentz, M. O. 1905. Methods of Measuring the Concentration of Wealth. *Publications of the American Statistical Association*. Vol. 9 No. 70: 209- 219.
- [24] Andrews, L. C. 1998. *Special Functions of Mathematics for Engineers*: SPIE Optical Engineering Press: Bellingham, USA.
- [25] Nelder, J. A., Mead, R. 1965. A simple method for function minimisation. *Computer Journal* 7. : pp 308- 313. doi: 10.1093/comjnl/7.4.308
- [26] Rosenbrock, H.H. (1960). "An automatic method for finding the greatest or least value of a function". *The Computer Journal*. 3 (3): 175–184. doi:10.1093/comjnl/3.3.175. ISSN 0010-4620
- [27] Szabó, F. J.: Evolutionary Based System for Qualification and Evaluation of Group Achievements (EBSYQ). *International Journal of Current Research*, ISSN: 0975-833X, Vol. 9, Issue 08, pp. 55507 – 55516, August, 2017. www.journalcra.com/sites/default/files/21246.pdf

A HŐTÁGULÁS OKOZTA REPEDÉS VIZSGÁLATA VÉGESELEMES MÓDSZERREL

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF CRACKS CAUSED BY THERMAL EXPANSION

Máté Tamás, M.Sc. hallgató

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék, 1111 Bp. Műegyetem rkp. 3
e-mail: matetamas01@gmail.com*

Dr. Zwierczyk Péter T., Adjunktus

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék, 1111 Bp. Műegyetem rkp. 3
e-mail: z.peter@gt3.bme.hu*

ABSTRACT. In this paper, a new FE crack propagation method called SMART was studied in order to validate to implement in the next investigation of Thermal RCF phenomena. The validation was performed on a CTS specimen with mixed-mode loading conditions, evaluating the crack propagation angle. The results indicate that the new method performs well and shows similar values as the experimental evaluation.

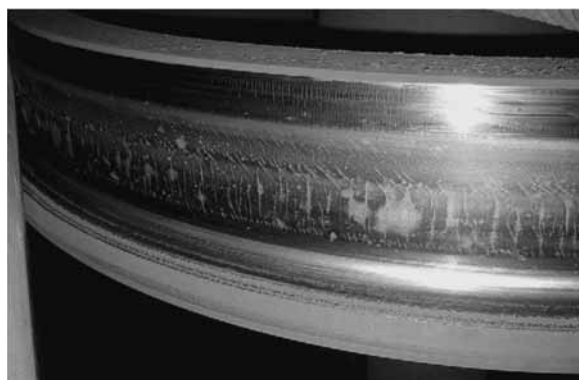
1. BEVEZETÉS

Vasúti kerekek esetében számos ok vezethet meghibásodáshoz, amely jelentősen befolyásolhatja a biztonságos menettulajdonságokat és a karbantartás költségeit. Az intenzív fékezésekkel járó tapadásvesztés blokkolásgátlóval szerelt járművek esetében nemkívánatos hőterhelést vonhat maga után a kerék futófelületén, amely jelentős hőtágulást eredményez nem csak a felületen, hanem közvetlenül alatta is [1]. Ezáltal káros maradó feszültségek keletkezhetnek a lehűlést követően.

Ezek az alkalmanként jelentkező hőterhelések és a folyamatos ciklikus sín-kerék kapcsolatból származó terhelések együttesen úgynevezett gördülő felületi kifáradáshoz (angol irodalomban Rolling Contact Fatigue, RCF) és ezáltal termikus repedések keletkezéséhez vezethetnek (1. ábra.).

Számos kutatás irányul az RCF jelenség mechanizmusának feltárására annak érdekében, hogy a tönkremenetelhez szükséges időt pontosabban meglehessen becsülni és ezzel a járművek üzemeltetési és biztonsági kockázatait csökkenteni lehessen.

A cikk célja egy új végeselemes repedésterjedési metódus bemutatása és validálása, amely a későbbiekben implementálható lehet különféle RCF problémák vizsgálatára.



1. ábra. Termikus repedésekkel borított kerék felülete [2]

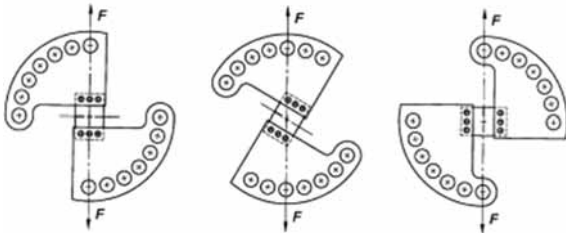
2. REPEDÉSEK VIZSGÁLATA

Repedések esetén tiszta egyirányú igénybevétel nagyon ritkán van jelen a gyakorlatban. Esetünkben az RCF jelenségnél is, Mode-I és Mode-II (4. ábra. Repedés terhelési módok), húzó és nyíró igénybevétel keveréke adja a terhelést. Ilyenkor a terjedő repedés sík normalisának iránya változik a kezdeti repedéséhez képest [3] (3. ábra.).

A vegyes terhelésű kifáradás tesztelése a mai napig nincs szabványosítva, ezért nehéz egyértelmű párhuzamokat vonni különböző geometriájú és mérés elrendezésű vizsgálatok között. Az egyik közkezdvelten alkalmazott mérés Richard [4] által leírt és alkalmazott vizsgálat, amely a CTS (Compact Tension Shear specimen) próbatest és a terhelőkészülék (2. ábra) segítségével ad információt a repedésterjedés paramétereiről.

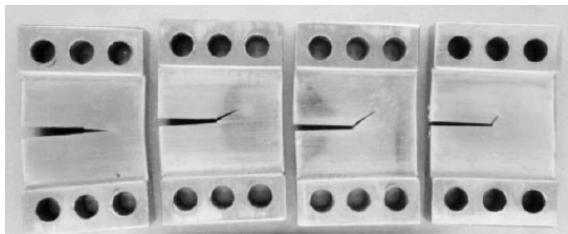
Peixoto és de Castro [5] ezt a módszert használta a vasúti kerék felszín alatti RCF repedésterjedés szimuláció paramétereinek validálására. A validálás a különböző numerikus számítások

és a kísérleti próbatetest repedésterjedési szögének összehasonlításával történt.



2. ábra. Compact Tension Shear (CTS) próbatetest geometriája és a terhelőkészülék [3]

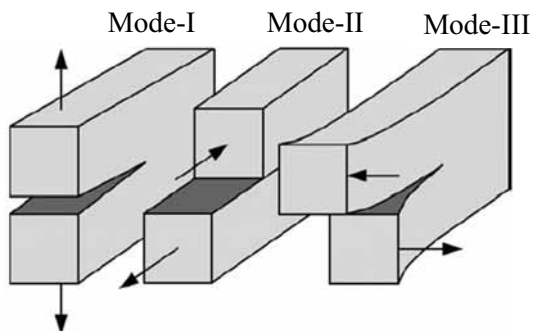
Ebben a cikkben az Ansys 19-es verziójában megjelent S.M.A.R.T. (Separation Morphing and Adaptive Re-meshing Technology) [6], új numerikus repedésterjedést modellező módszer kerül validálásra Peixoto és de Castro [5] mérésiének segítségével.



3. ábra A repedésterjedés iránya különböző vegyes terhelési irányokra CTS próbatesten [3]

3. VÉGESELEMES VIZSGÁLAT

A vizsgálatot három terhelési szögben végezzük: 30°, 45°, 60°, Peixoto és de Castro [5] cikke alapján.



4. ábra. Repedés terhelési módok [7]

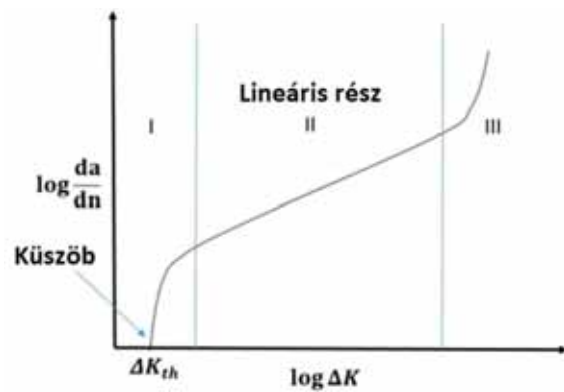
3.1. Repedésterjedés módszer - S.M.A.R.T.

A S.M.A.R.T. repedés-terjedést modellező eszköz előnye, hogy a repedés terjedésével egyidőben, lépésről lépésre frissíti a modellt a számításához szükséges hálót, így a felhasználó

könnyedén tudja vizsgálni az előre definiált repedést, hogy az miként és merre terjed tovább. A módszer lineáris törésmechanikai feltételezéssel dolgozik (LEFM – Linear Elastic Fracture Mechanics) [6]. A módszer által használt repedésterjedés modell a Paris törvény (1), amely megadja az adott anyagra és repedésre a repedés növekedési faktort [8] a repedésterjedés lineáris szakaszán (5. ábra.).

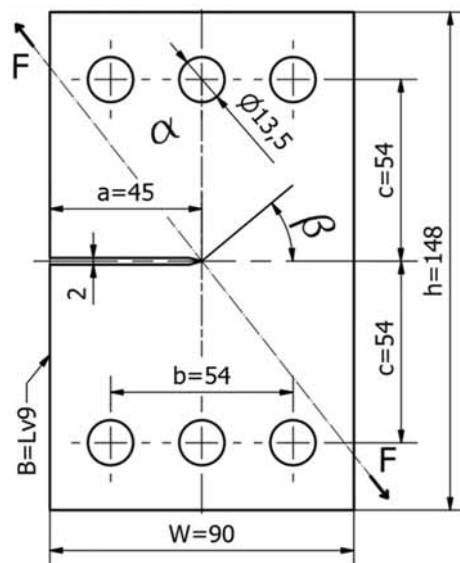
$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (1)$$

C és m a Paris törvény konstansai (a a repedés hossza, N a terhelési ciklusok száma, ΔK a feszültségintenzitási tényező tartománya), melyek az anyagtól és a repedés karakterisztikájától függenek.



5. ábra. Fáradásos repedés viselkedése fémekben [6]

3.2. Geometria felépítése – Repedés definiálása



6. ábra. CTS próbatetest és méretei

3.3. Anyagjellemzők

A repedésterjedés modellnek megfelelően a próbatest anyaga homogén izotrópnek feltételezett, lineárisan rugalmas viselkedésű acél. $E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$.

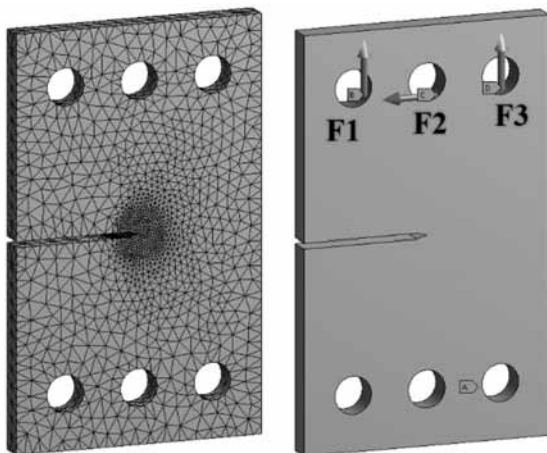
1. táblázat Paris törvény három terhelési estre adódó konstansai [5]

α	C	m
30°	2.87E-11	4.81
45°	7.49E-11	4.45
60°	3.24E-11	4.82

3.4. Végeselem háló felépítése

A háló tetraéder elemekből épül fel. Globális mérete 3 mm, a repedés torkánál 10 mm-es sugárban 1 mm-es elem sűrítés található (7.ábra.).

3.5. Peremfeltételek – Terhelések



7. ábra. A háló felépítése a próbatesten valamint a terhelések és a peremfeltételek

A próbatest az alsó 3 furatban hengeres kényszerrel van rögzítve axiális és radiális irányban. Terhelése $F = 1000 \text{ N}$ erő, amely a felső 3 furat (F_1, F_2, F_3) között van elosztva sorban, a következő összefüggések szerint [4]:

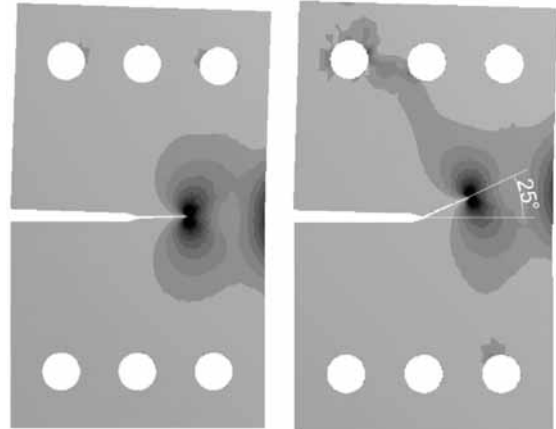
$$F_1 = F \cdot \left(\frac{1}{2} \cos \alpha - \frac{c}{b} \sin \alpha \right), \quad (2)$$

$$F_2 = F \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

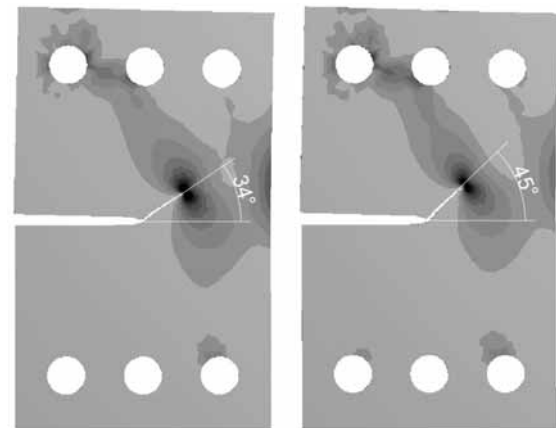
$$F_3 = F \cdot \left(\frac{1}{2} \cos \alpha + \frac{c}{b} \sin \alpha \right). \quad (4)$$

3.6. Eredmények

A kiértékelés nem feszültségoldalról, hanem fizikai-geometria oldalról történt, ebből kifolyólag az ábrákon látható skála nem mérvadó. Ahogy a 8. és 9. ábrán látható, a repedések terjedési szöge a terhelési szög növelésével szintén növekszik, tehát a tendencia megfelelő.



8. ábra. $\alpha = 0^\circ$ és $\alpha = 30^\circ$ -os terhelés esetén a repedés β szöge



9. ábra. $\alpha = 45^\circ$ és $\alpha = 60^\circ$ -os terhelés esetén a repedés β szöge

2. táblázat Peixoto és de Castro [5] - SMART módszer eredményeinek összehasonlítása

α	30°	45°	60°
β - Numerikus	26°	37°	49°
β - Abaqus (MTS)	25°	36°	48°
β - Kísérleti	23°	34°	46°
β - S.M.A.R.T.	25°	34°	45°

A 2. táblázatban találhatóak összehasonlítva a [5]-ben számított eredmények az Ansys új S.M.A.R.T. moduléval. Látható, hogy az eltérés

a kísérleti értékekhez képest csak 1-2 fok, és az egyéb numerikus módszerekhez képest sem számottevő, tehát elmondhatjuk, hogy az algoritmus megfelelően számítja a repedésterjedés irányát összehasonlítva a korábban publikált számításokkal.

Látható, hogy a módszer minimális eltérést mutat mind a kísérleti, mind a numerikus és az Abaqus által széles körben elterjedt módszerhez képest.

4. AZ IMPLEMENTÁLÁSI TERÜLETRŐL

A nagy hőterelés hatására termikus repedések keletkezhetnek. Ezt már feszültségi oldalról vizsgálta Zwierczyk Péter T. [9] és Váradi Károly [1]. Azért, hogy egy átfogóbb képet kapjunk a jelenség mechanizmusának megértésére szükséges, hogy a feszültség oldal mellett bemenő kritériumként vizsgáljuk a repedésterjedést is.



10. ábra. Termikus mikrorepedések a kerék felületén és a kerék oldalára is kiterjedt fáradásból adódó repedés [10]

5. ÖSSZEFOGALALÁS

Ebben a vizsgálatban CTS próbatesten tanulmányoztuk numerikus számítással a repedésterjedés irányát vegyes terhelés (Mode-I, Mode-II) hatására. A repedés irányának meghatározására az Ansys új S.M.A.R.T. módszerét használtuk, amely előnye, hogy minden megoldási lépésben automatikusan újrahálózza a modellt, így a felhasználó időt spórolhat. A cél az új módszer validálása volt Peixoto és de Castro [5] CTS kísérletei alapján. A lefutott számítások alapján elmondható, hogy a módszer eleget tesz a vártaknak, megfelelően kis hibával szimulálja a fizikai kísérletet.

A validálásra azért volt szükség, mert a későbbiekben ezt a módszert szeretnénk termikus repedések vizsgálatára használni.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az alábbi tanulmány és publikáció a Knorr-Bremse Ösztöndíjprogram keretében kerülhetett megvalósításra a Knorr-Bremse Rail Systems Budapest támogatásával.

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] P. T. Zwierczyk and K. Váradi, "Thermal Stress Analysis of a Railway Wheel in Sliding-Rolling Motion," *J. Tribol.*, vol. 136, no. 3, pp. 031401-031401-8, May 2014.
- [2] K. Handa, Y. Kimura, and Y. Mishima, "Surface cracks initiation on carbon steel railway wheels under concurrent load of continuous rolling contact and cyclic frictional heat," *Wear*, vol. 268, no. 1, pp. 50-58, Jan. 2010.
- [3] S. B. Biner, "Fatigue crack growth studies under mixed-mode loading," *International Journal of Fatigue*, vol. 23, pp. 259-263, Jan. 2001.
- [4] H. A. Richard, "Bruchvorhersagen bei überlagerter Normal- und Schubbeanspruchung von Rissen," *VDI-Forschungsheft*, vol. 631, pp. 1-60, 1985.
- [5] D. F. C. Peixoto and P. M. S. T. de Castro, "Fatigue crack growth of a railway wheel," *Engineering Failure Analysis*, vol. 82, pp. 420-434, Dec. 2017.
- [6] "SMART Crack Growth." [Web]. Elérhető: https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v190/wb_sim/ds_smart_crack.html?q=smart. [Accessed: 24-Oct-2018].
- [7] A. Ekberg and E. Kabo, "Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading—an overview," *Wear*, vol. 258, no. 7, pp. 1288-1300, Mar. 2005.
- [8] P. C. Paris, M. P. Gomez, and W. P. Anderson, "A Rational Analytic Theory of Fatigue," *The Trend in Engineering*, no. 13, pp. 9-14, 1961.
- [9] P. T. Zwierczyk, "Thermal and stress analysis of a railway wheel-rail rolling-sliding contact," PhD Thesis, Budapest, 2015.
- [10] E. R. Wuhrer, M. Cortie, P. Laczko, and P. J. Mutton, *Metallurgical and Ndt Aspects in the Management of Overheated Railway Wheels*. 2006.

CSAPÁGYHIBÁK FELTÁRÁSA IDŐTARTOMÁNYBELI MÓDSZEREKKEL

DETECTION OF BEARING FAILURES USING TIME DOMAIN FEATURES

Tóth Dániel, tanársegéd, toth.daniel@uni-miskolc.hu
Dr. Takács György, egyetemi docens, takacs.gyorgy@uni-miskolc.hu
Dr. Szilágyi Attila, egyetemi docens, szilagyi.attila@uni-miskolc.hu

ABSTRACT. Bearings are one of the most widely used machine elements. Their usage means risk for almost all forms of rotating equipment, such as pumps, machine tools, electric motors, generators, starters etc. Their operating properties impact the function of the whole machine, so defects should be detect as early as possible. This paper deals with vibration analysis techniques based on time domain features and presents special test methods.

1. BEVEZETÉS

A csapágyak az egyik leggyakrabban használt gépelemek, melyek rendkívül fontos szerepet töltenek be szinte minden forgógépben. Működési tulajdonságaik befolyásolják az egész gép működését. A csapágyazás hibája olyan meghibásodási sorozatot indíthat el a berendezésekben, amelyek akár több nagyságrenddel meghaladhatják a diagnosztikai vizsgálatok, illetve a csapágycsere költségeit is. A váratlan károsodások elkerülése érdekében elengedhetetlen a csapágyhibák korai diagnosztizálása [1,6].

Különböző technikák léteznek a csapágyak működési viszonyainak felügyeletéhez, amelyek segítenek meghatározni a csapágyhiba megjelenését. A leghatékonyabb csapágyvizsgálati módszerek közé tartoznak a rezgésdiagnosztikai elemzésen alapuló módszerek [9].

2. CSAPÁGYKÁROSODÁSOK

A csapágyak idő előtti tönkremenetelének oka lehet például a gondatlan kezelés, a számítottnál nagyobb terhelés, a nem elegendő vagy nem megfelelő kenés, a rossz hatásfokú tömítés vagy a túl szoros illesztések, melyek elégtelen belső csapágyhézagot eredményeznek [5]. Ezen tényezők mindegyike különleges csapágykárosodást okoz és a csapágyon rajta hagyja a maga speciális jelét. Egy károsult csapágyat megvizs-

gálva a legtöbbször véleményt lehet formálni a hiba okáról és ezt követően a szükséges intézkedéseket meg lehet tenni. A csapágykárosodások mindegyike jellegzetes hibákat okoz, melyeket elsődleges és másodlagos meghibásodásokra szokás osztani. Az elsődleges hibák közé sorolhatók a kopás, elkenődés, felületi károsodás, benyomódás, korrózió, és a villamos áram okozta károsodás. A primer károsodás tovább terjedéseként jelentkezhetnek a szekunder károsodások, mint például a lepattogzás és a repedés [4]. Gyakran előforduló csapágy meghibásodások a csapágygyűrű futófelületének kitöredezési hibái, a görgő vagy golyó lepattogzása, valamint a kosár tönkremenetelei.

3. REZGÉSDIAGNOSZTIKA

A rezgésdiagnosztika alkalmazásával a szerkezet megbontása vagy leállítása nélkül bármikor megállapítható a kérdéses egység várható élettartama, károsodásának mértéke, pillanatnyi állapota, majd ezek alapján egy esetleges beavatkozás szükségessége és ennek időpontja az üzemeltetés függvényében [2,3]. A csapágyak rezgésdiagnosztikai vizsgálataira különféle idő-, és frekvenciatartományon elvégezhető jelanalizációs technikák léteznek.

Helyi defektusok időtartományon való kimutatása úgy is lehetséges, hogy a rezgést monitoron jelenítik meg, esetleg kinyomtatják diagram formájában, majd ezeken olyan amplitúdó kiugrásokat figyelnek meg, amelyek egy-egy jellegzetes helyi defektushoz köthetők. Ezzel kapcsolatosan egyes szerzők [1,8] olyan módszereket alkalmaztak, amikor egy meghatározott számú amplitúdó egy előre beállított értéket meghalad. A sáváteresztő szűrési technikák jól alkalmazhatók időtartományon történő vizsgálatok esetén. Ennek alapját az a jelenség képezi, mely szerint a helyi defektusból származó impulzív jellegű terhelés nagyfrekvenciájú rezgéseket kelt, melyeket olyan jelátalakítók

segítségével detektálhatunk, melyek sajátfrekvenciái erre a tartományra hangoltak [7].

A rezgésdiagnosztikai adathalmaz frekvenciatartományon történő feldolgozása - melyet másként spektrumanalízisnek is neveznek – az egyik leghatásosabb gépállapot-felmérő eszköz. A csapágyhibák elemzése esetén ez a módszer képes arra is, hogy kimutassa a különböző csapágyelemek sérülését. Ismeretes, hogy a csapágy, mint rugalmas test, azzal az alapvető mechanikai tulajdonsággal rendelkezik, hogy leginkább egy-egy bizonyos sajátfrekvencián képes adott irányokban rezgéseket végezni. A felvett rezgésjel spektrumának elemzésével ezek a jellegzetes frekvenciák láthatóvá válnak, és az aktuális gépfordulatszám figyelembevételével hozzárendelhetők a csapágyalkatrészekhez. Defektus megjelenése és továbbfejlődése esetén e jellegzetes frekvenciákon kibocsájtott rezgési energia megváltozik, és ez a spektrumban is megjelenik. A spektrumanalízis nyújtotta lehetőségekre támaszkodva hasznos információk kaphatóak a rezgés jellegéről, a hibák (csapágyon belüli) elhelyezkedéséről, és azok relatív nagyságáról [9,10].

4. A CSAPÁGYVIZSGÁLÓ BERENDEZÉS

Kísérleti úton vizsgálóberendezés segítségével határozható meg a csapágyak állapota. Ilyen berendezés található a Miskolci Egyetem, Szerzőgépek Intézeti Tanszékén (1. ábra). A vizsgálóberendezés alkalmas csapágyak fárasztására és mérésére (rezgésvizsgálatára) egyaránt.



1. ábra. A csapágyvizsgáló berendezés

Az ábrán látható baloldali orsó kizárólag a fárasztást végzi, a jobb oldalon lévő pedig a vizsgálo orsó. A két orsó csapágyazásukban különbözik egymástól. A fárasztó orsó masszív,

kétsoros, önbeálló golyóscsapágyakon, a mérő orsó pedig siklócsapágyakon fut. Így küszöbölhetők ki a masszív gördülő csapágyazásból eredő rezgések. A vizsgálandó csapágyak a tengelycsapokra illeszthető szerelt házban helyezük el. Az orsókat egy frekvenciaváltóval vezérelt villamosmotor hajtja. Az ábra alsó részén figyelhető meg a hidraulikus munkahenger, amely az adott műterhelést biztosítja. A mérések során a vizsgálóorsó 1500 [min⁻¹] fordulatszámon működik, míg a hidraulikus munkahenger 1 [kN] műterhelést fejt ki, így a mérőorsó siklócsapágyának élettartama csak elhanyagolható mértékben változik a vizsgálatok során.

5. A VIZSGÁLATOK BEMUTATÁSA

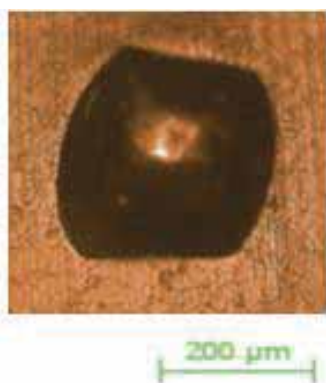
A csapágyak állapotfelmérése laboratóriumi körülmények között kétféle módszerrel valósítható meg. Az egyik módszer, amikor a vizsgált csapágyat fárasztóvizsgálatnak vetik alá és tönkremenetelig járattják. A fárasztóvizsgálatok során a hőmérsékletet, illetve a rezgésértékek trendszerű változását mérik, esetleg a kenőanyag összetétel változást. Az eljárás viszonylag hosszú ideig tart, növelt fordulatszámmal, a csapágy túlterhelésével, vagy a kenőanyag megvonásával a tönkremenetel gyorsítható, szimulált körülmények közötti mérések végezhetőek [6]. A másik módszer, amikor az adott csapágyon egy vagy több mesterségesen generált hibát hoznak létre, és ennek hatását elemzik. A hiba létrehozásához különleges technika szükséges, ugyanis a csapágy anyaga nagy keménységgel rendelkezik (HRC 58 – HRC 65).

Jelen tanulmányban egy újfajta, speciális módszerrel végeztünk vizsgálatokat. Kis kiterjedésű, jól reprodukálható mesterséges hibát tudunk létrehozni az Oxford Precision HR - 150A típusú keménységmérő berendezés segítségével. A csapágy kiválasztásánál a legfontosabb kritérium a tesztelésre való alkalmasság volt. Olyan csapágyat kellett választani, amely roncsolásmentesen szétszerelhető. Ezen szempontok és a rendelkezésre álló források figyelembe vételével, 6304 típusú, műanyag kosaras, egysorú, mélyhornyú golyóscsapágyra esett a választás. A csapágy szétszerelésénél először a műanyagkosarat kellett eltávolítani, majd a csapágy belső gyűrűjét kellett kisorsolni, így a csapágy sérülésmentesen szétbonthatóvá vált. Ezután a keménységmérő segítségével lenyomatot lehetett készíteni a csapágy különböző elemeire. A 2. ábrán látható a kis kiterjedésű hiba a csapágygyűrűn.



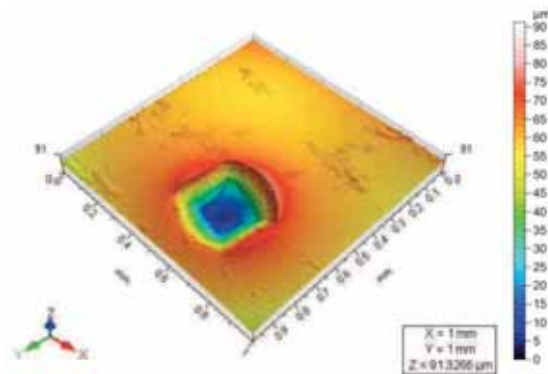
2. ábra. A mesterségesen létrehozott pontszerű meghibásodás

Az Oxford Precision keménységmérő segítségével háromféle terhelés hatását lehetett megvizsgálni. A 60, 100 és a 150 kilogrammos lenyomat hatását tanulmányoztuk. A hiba geometriai ellenőrzését a rendelkezésre álló Carl Zeiss Jenavert polarizációs mikroszkóp és AltiSurf 520 típusú mérőgép segítette. A 100 kilogrammos terhelés hatása figyelhető meg a 3. ábrán.



3. ábra. Mesterséges hiba a csapágyűrű futófelületén

A 100 kilogrammos terhelés hatására átlagosan 330 µm, míg a 60 kilogrammos terhelés esetén 250 µm átmérőjű hiba keletkezett. További geometriai ellenőrzéseket tett lehetővé az AltiSurf 520 mérőgép, így pontosan meg lehetett határozni a mélységet (4. ábra).



4. ábra. A mesterséges hiba 3D képe (100 kg-os terhelés)

A geometriai mérések szerint a lenyomat átlagos mélysége 60 kilogrammos terhelés esetén 60 µm, 100 kilogrammos terhelésnél pedig 90 µm. Az 5. ábrán látható a 150 kilogrammos terhelés hatása.



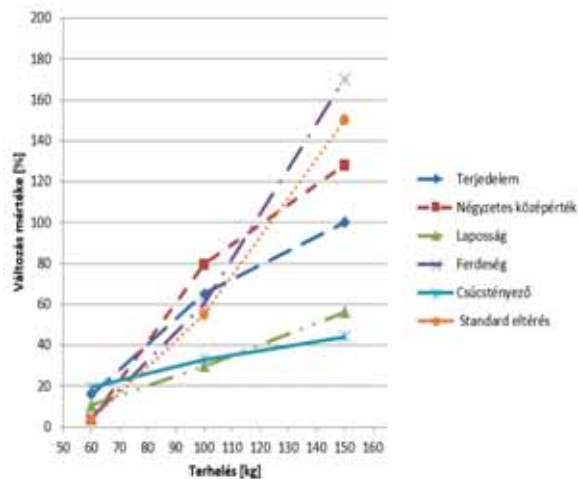
5. ábra. Mesterséges hiba a csapágyűrű futófelületén

A 150 kilogrammos terhelés hatására a hiba átlagosan 522 µm átmérővel és 110 µm mélységgel rendelkezett.

6. A MÉRÉSEK KIÉRTÉKELÉSE

A kísérletek során először rezgésmintát vettünk a vizsgált csapágyról hibamentes állapotban. Ezt követően szétszereltük a csapágyat, majd létrehoztuk a mesterséges hibát a keménységmérő berendezés segítségével. Ezután ismét rezgésmérés következett. A rezgésvizsgálatoknál a 4. pontban bemutatott csapágyvizsgáló berendezést alkalmaztuk. A rezgésméréshez Kistler gyártmányú 8632C50 típusú, piezoelektromos elven működő gyorsulásmérő szenzort választottuk ki. A mintavételi frekvencia 9600 [Hz], míg a minták elemszáma 16384 volt. A rögzített adatok kiértékelése időtartományon, statisztikai indexek segítségével történt. A kiértékeléshez a Maple matematikai szoftverben

szimbolikus nyelven megírt programkódot alkalmaztuk. Kivehető, hogy a statisztikai jellemzők a mesterséges hiba létrehozása után jelentősen megnöttek. A 6. ábrán a sztochasztikai jellemzők százalékos növekménye figyelhető meg.



6. ábra. A sztochasztikus jellemzők változása a terhelés függvényében

Ahogy a diagramon is megfigyelhető, a ferdeség, a négyzetes középérték és a standard eltérés (szórás) voltak a legérzékenyebbek erre a mesterséges hibára, mindazonáltal a másik két index (a laposság és a csúcstényező) is jól korrelál.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A csapágyvizsgálatok során a mesterségesen generált hibák okozta válaszjeleket elemezve, mélyebb diagnosztikai vizsgálatok végezhetőek el. Jelen tanulmány keretei között egy új, speciális módszer segítségével lett létrehozva mesterségesen generált hiba, majd ennek hatását elemeztük. A fokozódó rezgésértékek, valamint a rezgés nagyságának trendszerű időbeli változása jól jelezte a nem megfelelő csapágyállapotot. A kísérletek során az időtartománybeli vizsgálatokon alapuló módszerek jó megbízhatóságot mutattak. A sztochasztikus jellemzők, mint a jelek értékei eredményesen használhatók a csapágydiagnosztikai állapotfelméréshez.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.



9. IRODALOM

- [1] Wieslaw J. Staszewski, Amy N. Robertson: Time–frequency and time–scale analyses for structural health monitoring. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2007.
- [2] Dömötör Ferenc: *Rezgésdiagnosztika I.* Dunaújváros, 2008.
- [3] Dömötör Ferenc: *Rezgésdiagnosztika II.* Dunaújváros, 2010.
- [4] SKF, *Csapágyhibák és okai*, Termékinformáció 401. <http://www.skf.com/files/343743.pdf>
- [5] Eugene Matzan: Detecting Premature Bearing Failure. *Machinery Lubrication magazine*, May 2007.
- [6] Tóth Lajos Tibor: *Tranziens és kváziperiodikus folyamatok analízise az idő-frekvencia tartományban.* PhD értekezés, Miskolc, 2011.
- [7] Ladányi Gábor: *Diagnosztika a Karbantartásban.* Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, 2016.
- [8] X. Tian, F. Gu, D. Zhen, V. T. Tran, A. D. Ball: A study on transient enhancement for fault diagnosis based on an active noise control system. In: *CM 2012 and MFPT 2012*, London.
- [9] S. Patidar, P. K. Soni: An Overview on Vibration Analysis Techniques for the Diagnosis of Rolling Element Bearing Faults. *IJETT*, May 2013.
- [10] P. P. Kharche, S. V. Kshirsagar: Review of Fault Detection in Rolling Element Bearing. *IJRAE*, Vol. 1 Issue 5, June 2014.

A HIDROSZTATIKUS CSAPÁGYTERVEZÉS ÉS OPTIMALIZÁLÁS JELENLEGI FEJLEMÉNYEI

CURRENT DEVELOPMENT FOCUSES OF THE HYDROSTATIC BEARING DESIGN AND OPTIMIZATION

Tóth Sándor Gergő, PhD hallgató, szgttosg@uni-miskolc.hu
Dr. Takács György, egyetemi docens, takacs.gyorgy@uni-miskolc.hu
Dr. Szilágyi Attila, egyetemi docens, szilagyi.attila@uni-miskolc.hu

ABSTRACT.

The number of scientific articles dealing with hydrostatic bearings has jumped significantly over the last decade due to the huge increase in the development of the Far East industry. With new numerical calculations and simulations, the shape of the bearing pads, the fluid film thickness can be optimized and the behavior of special hydrostatic bearing designs can be tested. Considering the research results revealed, new directions for optimization, new applied fluids and further development directions are emerging.

1. BEVEZETÉS

A hidrosztatikus csapágyakat hosszú élettartamuknak, és forgási pontosságuknak köszönhetően a szerszámgépek egyik legfontosabb elemei lehetnének, azonban az elterjedésüket nagyban hátráltatja a gördülős csapágyakhoz képest jóval bonyolultabb méretezésük, gyártási pontosságra való érzékenységük, illetve a bonyolult mechanikai tulajdonságuk leírásának nehézségei. Emiatt az 1990-es évekig, a numerikus számítások és CFD szimulációk szélesebb elterjedésig, a hidrosztatikus csapágyak tervezése leginkább korábbi mérésekre és tapasztalatokra épült. Miközben Európában a hidrosztatikus csapágyazásokkal foglalkozó vállalatok egyre inkább kezdenek kiszorulni, addig a Távol-Keleten a nagy ipari fejlesztéseknek köszönhetően egyre több publikáció foglalkozik a hidrosztatikus csapágyak fejlesztésével.

Az új publikációk a hidrosztatikus csapágyak tervezésénél és elemzésénél immáron a mérnöki alkalmazhatóságot is figyelembe veszik. Az 1990-2018-as időszak alatt közel 200 új publikáció született a témában. Az elméleti kutatások egy része a Reynolds egyenlet javításával foglalkozik, míg a publikációk nagyobb hányada felosztható a csapágypárna alakja, nyomás szabályozás módja, illetve csapágykialakítás szerint.

2. A HIDROSZTATIKUS CSAPÁGYAK ALAPEGYENLETEI

A hidrosztatikus csapágyak tanulmányozásához a Reynolds egyenlet nyújt megfelelő alapegyenletet, amely segítségével vékony folyadék rétegű áramlásban a nyomáseloszlás meghatározható, míg hőtani analízisre a folyadékáramlás energiaegyenlete választható. Az energiaegyenlet és a Reynolds egyenlet összevonásával M. Khelifi, [1] foglalkozott,

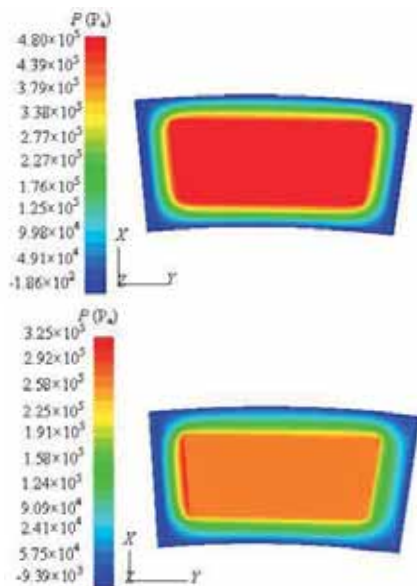
$$u \frac{\partial T}{\partial x} + \left(v - u \frac{\partial h}{\partial x} - w \frac{\partial h}{\partial z} \right) \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k_c}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\eta}{\rho c_p} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (1)$$

melyben, u, v, w a folyadéksebesség x, y, z irányban, T a folyadék hőmérséklete, η a dinamikus viszkozitása, ρ a sűrűsége, k_c a hővezetési tényező, és c_p a fajhő (adott nyomáson). A Reynolds egyenlet egy másodrendű differenciálegyenlet, melynek analitikusan történő megoldása körülményes, illetve csak newtoni folyadékokra alkalmazható. A reológiai és más nem newtoni folyadékok, áramlásának leírásával E De la Guerra Ochoa [2] foglalkozott, aki a Reynolds egyenletet nem-newtoni folyadékokra történő alkalmazását vizsgálta, ehhez Carreau dinamikus viszkozitásra felírt függvényét alkalmazta (2),

$$\eta = \eta_0 \left(1 + \left(\frac{\tau}{G} \right)^2 \right)^{\left(\frac{1 - \left(\frac{1}{n} \right)}{2} \right)} \quad (2)$$

ahol η_0 a nyugalmi állapotban mért dinamikus viszkozitás, τ nyírófeszültség, G nyíró rugal-

massági modulus, n (0.2...1) a Carreau exponenciális kitevő, mely az adott nem newtoni folyadékot jellemez. A Reynolds egyenletet az összes jelenleg alkalmazott csapágypárna alakra felírásra kerültek. A Reynolds egyenlet analitikus megoldásával ki lehet fejezni az egyes paraméterek hatásait, de ehhez komplex matematikai levezetések és egyszerűsítések szükségesek. A CFD szoftverek segítségével mérnöki problémák szimulációjára szolgálnak, új modellek interpretálása azonban körülményes, ezért elméleti kutatásokban a numerikus számítás terjedt el. A számítási eredmények és új modellek validálásához számottevően kevesebb kísérlet került publikálásra. Zhang Y. G. [3] a fordulatszám és nyomáseloszlás közti összefüggést ellenőrizte kísérleti módon, illetve véges differenciás módszerrel történő szimulációval.



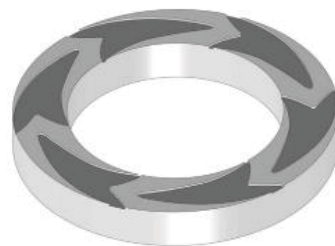
1. ábra. Hidrosztatikus csapágy párnáján a folyadék nyomáseloszlása 2 és 20 1/min fordulatszám esetén [3].

3. AXIÁLIS HIDROSZTATIKUS CSAPÁGYAK KUTATÁSI EREDMÉNYEI

Axiális hidrosztatikus csapágyaknál általában kör és gyűrű alakú csapágypárnát alkalmaznak. A körgeometria miatt hengerkoordináta rendszerrel felírható Reynolds egyenlet számítása egyszerűbbé válik, illetve a könnyebb gyárthatósága miatt a publikáció legnagyobb hányada ezzel a csapágytípussal foglalkozik. A publikációk négy témacsoportra oszthatók: az axiális csapágyak tervezése és fejlesztése, felület textúrázásával kapcsolatos kutatások, csapágyopti-

malizálás és a dinamikus viselkedés tanulmányozása. Antoon van Beck [4] megállapította, hogy rugalmas csapágyfelületek (*a folyadékfilm vastagságát megtartva*) kedvezően hatnak a csapágy terhelhetőségére., ezen felül analitikusan származtatta a rugalmas megtámasztásból származó csapágyterhelhetőséget. A konvex alakú deformációt ebben az esetben kerülni kell, viszont kismértékű konkáv deformáció megengedett. Későbbiekben a modellt többen felhasználták lineáris deformációt feltételező-, valamint felületérdességet figyelembe vevő új numerikus modellekben.

Y. Kang [5] zárt axiális csapágyakkal megtámasztott körasztal dinamikai viselkedését tanulmányozta kapilláris és áramállandósított szivattyú esetén. Az áramállandósított szivattyúval szabályozott axiális csapágy merevsége számottevően nagyobb, mint a kapilláris szabályozás esetében. Ezen felül a statikus terhelés jelentősen befolyásolja a hidrosztatikus csapágy dinamikus karakterisztikáját. T. A. Osman [6] gyűrűkamrás axiális hidrosztatikus csapágy dinamikai tulajdonságát vizsgálta. Számításai alapján optimális térfogatáram határozható meg a csapágy teherbírás, merevség és csillapítás viszonylatában. Ezen felül az is megállapítható, hogy a csapágy tulajdonságai nagy mértékben romlanak, ha csapágyfelületek nem párhuzamosak egymással. F. Shen [7] több csapágykamra formát vizsgált meg (*téglalap, kör, gyűrű, ellipszis*), az eredmények alapján a kör alakú nyomókamra segítségével érhető el a legnagyobb merevség, míg a gyűrűs csapágykamrával lehet a legnagyobb folyadéknyomást biztosítani.



2. ábra. Axiális hidrosztatikus csapágy álló lapja optimalizált hornyokkal [8]

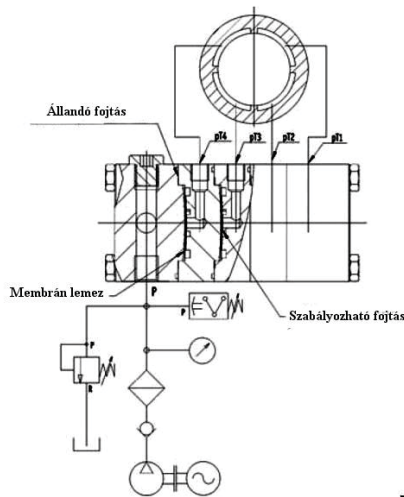
A nagysebességen történő alkalmazásának korlátját axiális csapágyak esetén a centrifugális tehetetlenségi erő szolgálja. Ennek kompenzálására a csapágyfelszín spirális textúrázása, valamint áramvonalas csapágyhornyok [8] alkal-

mazhatóságát vizsgálják. Jelenleg ezeket a speciális felszínű csapágyakat csak mikroglyártásnál, illetve aerosztatikus csapágyazásoknál alkalmazzák.

4. RADIÁLIS HIDROSZTATIKUS CSAPÁGYAK KUTATÁSI EREDMÉNYEI

Radiális hidrosztatikus csapágyakról szóló publikációk száma jelentősen kevesebb, mint axiális csapágy esetén, ez elsősorban a sokkal bonyolultabb csapágyfelületnek köszönhető. A publikációk nagyobb hányada a csapágyak statikus terhelések szimulációjával foglalkozik, kisebb hányadban a dinamikus viselkedés leírásával, ezen felül kombinált radiális-axiális csapágyazások kutatása is zajlik.

Radiális hidrosztatikus csapágyak alkalmazását nagyban befolyásolja a fordulatszámából származó korlátok. Összenyomható folyadék esetén a radiális csapágy csillapítási képessége romlik kis fordulatszámon, míg nagy fordulatszám esetén örvényinstabilitás jelentkezik [9]. S.C Jain analitikus megoldással összehasonlította a különböző kamraszabályozásokat. A számítások alapján a membrános áramállandósító szeleppel (3. ábra) történő szabályozással érhető el a legnagyobb terhelhetőség és merevség.



3. ábra. Membrános áramállandósító szelep hidraulikus kapcsolási rajza (Hyprostatik)

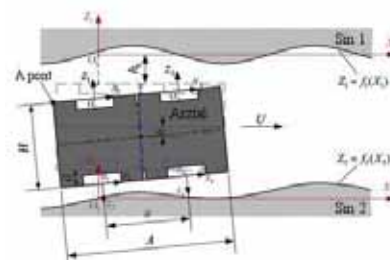
Jerry C.T. Su és K.N. Lie [10] hibrid (hidrosztatikus/hidrodinamikus) csapágyazás nagysebességű forgásából származtatható jelenségeket vizsgálta. A forgás hidrodinamikai hatást indukál, a hidrosztatikus hatás határ fordulatszáma

kitolható több soros, hornyos kiömlőkkel, azonban a hidrodinamikus merevség romlik ezáltal. A hidrodinamikus hatás javítható a csapágyhossz/átmérő növelésével is (L/D). Nagysebességű működtetés esetén kisebb kiömlőket célszerű kialakítani. S.C. Sharma [11] különböző kamra alakokat vizsgált megválasztott csapágyparaméterek szerint. A négyszög vetületű kamra biztosítja a legnagyobb terhelhetőséget az olajfilm réteg vastagság függvényében. Ennek ellenére a kör vetületű kamra merevsége a legnagyobb. A háromszög vetületű csapágykamrát a nagysebességű működtetéshez szükséges stabilizálásához lehet alkalmazni. Ezekkel az eredményekkel párhuzamosan a nem-newtoni, nano méretű mágneses részecskéket tartalmazó reológiai folyadékokkal történő kísérletek is elkezdődtek.

5. HIDROSZTATIKUS VEZETÉKRENDSZEREKKEL KAPCSOLATOS TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A hidrosztatikus csapágyazások közül a hidrosztatikus vezetékek gyártása a legegyszerűbb a szabályos alakú csapágykamra kialakítás miatt. A jelenlegi kutatások főbb irányai a hidrosztatikus vezetékek dinamikus viselkedésének tanulmányozása, szimulációja, ezen felül a pontossági hibaanalízis és optimalizációs lehetőségek kutatása. Számottevően kevesebb kutatás készült korábban hidrosztatikus vezetékekkel kapcsolatban, ugyanis a Reynolds egyenletet derékszögű koordináta-rendszerben nehezebb egyszerűsíteni, amely az analitikus számítást bonyolítja.

Yikang D.U. [12] a hidrosztatikus vezetékrendszerek dinamikai tulajdonságát vizsgálta a folyadék-összenyomhatóság és tehetetlenségi erő figyelembe vételével, eredményei alapján a Maxwell-féle dinamikai modell folyadékkenés esetén jól alkalmazható.



4. ábra. Hidrosztatikus vezeték mozgáshibájának meghatározására készített elméleti modell [13]

Zhiwei Wang [13] a hidrosztatikus vezetékek mozgáshibájának meghatározásához egy új modellt hozott létre (4. ábra). Az asztal sebessége szintén befolyásolja a mozgáshibát, a tápnyomás növelésével ez a hatás csökkenthető. A folyadékfilm vastagsága növelésével a mozgáshiba szintén javítható.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az alábbi cikkben különböző hidrosztatikus csapágyazásokról szóló jelentősebb tudományos publikációk kerültek összefoglalásra. A legtöbb publikáció továbbra is a Reynolds egyenletre alapszik, amellyel jó hatékonysággal és pontossággal elemezhetők a különböző típusú csapágyak felszínén áramló folyadék filmréteg, viszont a csapágykamrákban fellépő áramlás leírására csupán csak közelítő eredményt biztosíthat. A nem-newtoni folyadékok megjelenésével a Reynolds egyenletet szintén módosítani szükséges, hogy a dinamikus viszkozitásának változását kezelni lehessen.

Az egyszerűsített analitikus megoldást a számítástechnikai fejlődés fokozatosan átveszi a numerikus számítások. Új egyre pontosabb számítási modellek kerülnek lefektetésre, amelyek egyre inkább figyelembe veszik a csapágyparaméterek egymás közötti kapcsolatait is. A számítási idők rövidülése és a számítási pontosság növekedése miatt CFD rendszeren belül véges differenciál és véges elem módszerrel szimulációk hozhatók létre.

A hidrosztatikus csapágyak kamráinak nyomásszabályozása történhet kapilláris vezetékkel, fojtószeleppel vagy membrános áramlálandósítóval, utóbbival lehet elérni jelenleg a legnagyobb terhelhetőséget és merevséget. Habár a hidrosztatikus csapágy önszabályozó rendszer, szervoszivattyúk segítségével állandó, közvetlenül szabályozott nyomás lehetne elérni, amellyel a nyomásszabályzó elemeket el is lehetne hagyni. A mágneses reológiai folyadékok alkalmazásával szintén belső szabályzást lehetne elérni, a csapágy teherbírás képességét növelve.

Számos kutatás foglalkozik a csapágy-párna és kamra alakjának optimalizálásával. A spirális hornyok, vagy áramvonalasított csapágykamrák jelenleg csak axiális hidrosztatikus csapágyaknál fordulnak elő. A CFD szimulációk segítségével a kamraforma radiális csapágyak esetén is optimalizálhatóvá válik majd. Az új optimalizációs módszerek segítségével a csapágytervezés és méretezés szintén javíthatók.

A hidrosztatikus vezetékrendszerek és csapágyazások Európában egyre inkább a periferiára szorulnak, így új kutatási eredmények továbbra is Távoll-Keletről várhatóak.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS



Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült”

8. IRODALOM

- [1] M. El Khlifi, D. Souchet M. Hajjam, F. Bouyahia: Numerical Modeling of Non-Newtonian Fluids in Slider Bearings and Channel Thermohydrodynamic Flow, J. Tribol.: T 129; pp. 695-699, 2007
- [2] E. de la G. Ochoa, J. E. Otero, A. S. López, E. C. Tanarro: Film thickness predictions for line contact using a new Reynolds-Carreau equation, J. Tribol. 82, pp.133-141, 2015
- [3] Zhang Y., Fan L., Li R., Dai C., Yu X.: Simulation and experimental analysis of supporting characteristics of multiple oil pad hydrostatic bearing disk, Journal of Hydrodynamics, 25 (2) pp.236-241, 2013
- [4] A. van Beek, R. A. J. van Ostayen: Analytical solution for tilted hydrostatic multi-pad thrust bearings of infinite length, Tribology International 30, pp. 33-39, 1997
- [5] Y. Kang, H.-C. Chou, Y.-P. Wang, C. H. Chen: Dynamic Behaviors of a Circular Worktable Mounted on Closed-Type Hydrostatic Thrust Bearing Compensated by Constant Compensations, Journal of Mechanics, 29, pp. 297-308, 2013
- [6] T. A. Osman, Z. S. Safar, M. O. A. Mokhtar: Design of annular recess hydrostatic thrust bearing under dynamic loading, Trib. Internat. 24, pp.137-141, 1991
- [7] F. Shen, C.-L. Chen, Z.-M. Liu: Effect of Pocket Geometry on the Performance of a Circular Thrust Pad Hydrostatic Bearing in Machine Tools, Trib. Transactions 57, pp.700-714, 2014
- [8] M. Fesanghary, M.M. Khonsar: On the optimum groove shapes for load-carrying capacity enhancement in parallel flat surface bearings: Theory and experiment, Trib. Inter. 67 pp. 254-262, 2013
- [9] W. B. Rowe: Dynamic and Static Properties of Recessed Hydrostatic Journal Bearings by Small Displacement Analysis, J. Lubrication Tech. 102, pp.71-79, 1980.
- [10] J. C.T. Su, K. N. Lie: Rotational effects on hybrid hydrostatic/hydrodynamic journal bearing. Industrial Lubr. and Trib. 53, num. 6, pp.261-269, 2001.
- [11] S. C. Sharma, R. Sinhasan, S. C. Jain, N. Singh, S. K. Singh: Performance of Hydrostatic/Hybrid Journal Bearings with Unconventional Recess Geometries, J. Trib. Transactions 41, pp. 375-381, 1998.
- [12] Yikang D., Kuanmin M., Yaming Z., Fengyun W., Xiaobo M., Bin L.: Dynamic modeling of hydrostatic guideway considering compressibility and inertia effect. Frontiers of Mechanical Engineering 10, pp.78-88, 2015.
- [13] Zhiwei W., Wanhua Z., Yaolong C., Bingheng L.: Prediction of the effect of speed on motion errors in hydrostatic guideways, International J. Machine Tools & Manufacture 64 pp.78-84, 2013.

CONTENTS

1. Dr. Czifra Árpád, Dr. Horváth Sándor: 5 TOPOLOGICAL MAPS OF DIFFERENTLY MACHINED SURFACES	11. Kis Katalin, Dr. Ficzer Péter, Dr. Kovács Norbert Krisztián, Dr. Szabó Gábor: 49 TESTING OF FLEXIBLE PLASTICS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY
2. Debreczeni Dániel, Dr. Kamondi László: 9 ZAHNFEDERSTEIFIGKEITS- UND VERFORMUNGSBERECHNUNG BEI EVOLVENTISCH-AUSSENVERZAHNTEN, ZYLINDRISCHEN ZAHNRADPAAREN	12. Kocsis B., Kóti D, Kovács G.: 54 INVESTIGATING THE EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS OF AMORPHOUS MAGNETIC MATERIALS BY CLASSIC METALLOGRAPHIC AND INDIVIDUAL MAGNETIC MEASUREMENTS
3. Dr. Dömötör Csaba: 13 EXPERIENCE FROM EXPOSITION OF INDUSTRIAL DESIGN ENGINEERING STUDENTS	13. Dr. Lovas László: 59 NOTES ON BOLTED LINK MODELLING
4. Dr. Ficzer Péter: 17 RELATIONSHIPS BETWEEN THE INDUSTRY 4.0 AND THE INDIVIDUALIZED MEDICAL IMPLANTS	14. Lukács Judit, Melegh Gábor: 63 APPLICATION OF RESPONSE SURFACE METHODOLOGY IN CASE OF ACOUSTIC STUDIES OF VEHICLES
5. Bogya Péter, Dr. Ficzer Péter, Dr. Horváth Eszter, Dr. Lovas László: 21 FROM CT SCAN TO THE CAD GEOMETRY	15. Németh Géza: 69 MODELING AND LOADS OF HELICAL TORSION SPRINGS
6. Horváth Richárd, Stadler Róbert Gábor: 25 THE INVESTIGATION OF MILLING PROCESS OF GLASS FIBRE REINFORCED PLASTIC	16. Németh Géza: 73 FRICTION ASSESMENT OF LUBRICATED STEEL PAIRS OF SURFACES
7. Hriczó Krisztián: 31 THE EFFECT OF THE MAGNETIC POTENTIAL IN THE FLOW OF VISCOSE FERROFLUID	17. Suriné Lengyel Veronika: 77 TPM VS. INDUSTRIE 4.0 – ANOMALIE ODER POTENTIAL?
8. Kaczvinszki-Szabó Vera, Telekes Gábor: 35 COMPARISON OF METHODS USED FOR THE PILE FOUNDATION PLANNING OF HIGH- BASED AND FERROUS AGRICULTURAL INDUSTRY COMPLEXES	18. Dr. Szabó Ferenc János: 82 ITERATION HISTORY ANALYSIS OF EVOLUTIONARY TYPE OPTIMIZATION ALGORITHMS
9. Kardos Szilárd, Dr. Krisch Róbert: 41 DEVELOPMENT OF A FLAT WHEEL HARMONIC DRIVE AT K.K.K. 99 CO. LTD.	19. Máté Tamás, Dr. Zwierczyk Péter: 86 FINITE ELEMENT ANALYSIS OF CRACKS CAUSED BY THERMAL EXPANSION
10. Dr. Kátai László, Dr. Szabó István, Lágymányosi Attila, Lágymányosi Péter, Dr. Szakál Zoltán: 45 INVESTIGATING THE STRENGTH PROPERTIES OF A MATERIAL USED IN ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY DEPENDING ON THE PARAMETERS OF 3D PRINTING	20. Tóth Dániel, Dr. Takács György, Dr. Szilágyi Attila: 90 DETECTION OF BEARING FAILURES USING TIME DOMAIN FEATURES
	21. Tóth Sándor Gergő, Dr. Takács György, Dr. Szilágyi Attila: 94 CURRENT DEVELOPMENT FOCUSES OF THE HYDROSTATIC BEARING DESIGN AND OPTIMIZATION

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. Jáрмаi Károly
Dr. Péter József
Dr. Szabó Szilárd
Deputy

Dr. Barkóczi István
Bányai Zoltán
Dr. Beke János
Dr. Bercsey Tibor
Dr. Bukoveczky György
Dr. Czitán Gábor
Dr. Danyi József
Dr. Dudás Illés
Dr. Gáti József
Dr. Horváth Sándor
Dr. Illés Béla
Kármán Antal
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
Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit
Dr. Zobory István

DEAR READER,

The organization of the 34rd Conference of the Designers and Product Developers was begun on time as usual, the circle of the possible participants were looked for by letters. By varying slightly the deadline the friendly invitation was repeated and this seemed to be successful. The participants applied for our conference by 58 presentations and 30 papers. Considering the volume, it is the same as it was last year. The papers are published in two periodicals of the GÉP (Machine).

Analysing the names of presenters, authors and co-authors, the change seems to be strong. Excellent, well-known authors are missing, new and encouraging names have appeared. There are many young presenters, the authors or co-authors of the 30 pieces of papers are post- or undergraduate students. The phenomenon is not unique, there is a similar changing in the other parts of the world, and in the other areas of the science. Beside or instead of the populous generation born after the war, there are essentially younger ladies and gentlemen appeared. I am surfing at the sites of NASA willingly, there are many young ladies among the designers and developers who – with their vision mode differing from that of the men – are bearing original solutions. Perhaps this formulation is not offensive.

The change can be perceived in the subject of presentations and papers, too. The horizons of the presenters, the available knowledge and solving tasks are wider than before. Besides the results of mathematics, mechanics, material science, production science, machine design and theory of design the results of research of information technology, ergonomics, biology, medicine, psychology, industrial design and nature analogies appear. I am very glad to announce that this year there are lectures and articles on the history of technology, proving the validity of the latin proverb, *historia est magistra vitae*.

Dr. József Péter
organizing secretary of the Conference

Managing Editor: Vesza József. Editor's address: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Phone/fax: (+36-46) 379-530, (+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: 202-0656, Fax: 202-0252, E-mail: a.gaby@gteportal.eu, Web: www.gte.mtesz.hu

Web: http://www.gepujsag.hu * Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Publisher: Dr. Igaz Jenő, Managing Director

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Telefon: 06-46/379-530 • e-mail: gazdasz@chello.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: 06-1-767-8262, or mail to: MP Zrt. 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered from overseas and to overseas at Magyar Posta Zrt. Visit: www.posta.hu WEBSHOP (https://eshop.posta.

hu/storefront/), mail to: 1900 Budapest, 06-1-767-8262, or hirlapelofizetes@posta.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

14.45-15.00 Dr. Bihari János egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet: Kis fogszámú hajtófogaskerekek tervezési problémái

15.00-15.15 Horváth Richárd PhD, egyetemi docens, Stadler Róbert Gábor Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar: Üvegszállal erősített polimer (GFRP) marási vizsgálata

15.15-15.30 Lukács Judit tanársegéd, Óbudai Egyetem: Válaszfelületek módszerének alkalmazása gépjárművek akusztikai vizsgálatában

15.30-15.45 Vermes Brúnó PhD hallgató, BME Gépészmérnöki Kar Polimertechnikai Tanszék, MTA-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Dr. Czigány Tibor egyetemi tanár BME Polimertechnikai Tanszék, MTA-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport: Kompozitok alakváltásának lehetőségei

15.45-16.00 Tóth Dániel tanársegéd, Dr. Takács György egyetemi docens, Dr. Szilágyi Attila egyetemi docens Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Intézeti Tanszéke: Csapághibák feltárása időtartománybeli módszerekkel

16.00-16.15 Dóczy Martin Olivér MSc hallgató BME Gép- és Terméktervezés Tanszék, Dr. Simonovics János egyetemi adjunktus BME Gép- és Terméktervezés Tanszék: Egyedi vápakosaras rögzítés végelelemes modelljének elkészítése

16.15-16.30 Máté Tamás demonstrátor, Dr. Zwierczyk Péter Tamás adjunktus BME Gép- és Terméktervezés Tanszék: Hótágulás okozta repedés vizsgálata végelelemes módszerrel

16.30-16.45 Dr. Papp Zoltán múzeumigazgató: A vízemelő kos története

16.45-17.00 Dr. Szabó Ferenc egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet: Optimális algoritmusok iteráció-történetének vizsgálata

17.00-17.15 Erdei Réka, MSc gépészmérnök hallgató, Miskolci Egyetem, Jálics Károly c. egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet: Ultrahangos anyagvizsgálat támogatása számítógépes modellezéssel

I. SZEKCIÓ, I. EMELET, DEÁK-TEREM

2018. NOVEMBER 9. (PÉNTEK) DÉLELŐTT 9.00-TÓL

Szekcióvezető: Dr. Jálics Károly egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

9.00-9.15 Dr. Szávai Szabolcs egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet, Béres Levente tudományos munkatárs, Kelenföldi Brigitta kutató, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Nonprofit Kft.: Gördülő felületpárok vizsgálati próbatestének felületkezelési technológiai modellezése és validálása

9.15-9.30 Dr. Kovács Sándor tudományos munkatárs, Margitai Péter junior kutató, Dr. Szávai Szabolcs osztályvezető, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Nonprofit Kft.: Modellalkotás kihívásai cink bevonatú réz elektromos csatlakozók fretting korróziójának vizsgálatok

9.30-9.45 Ungár Péter junior kutató, Bézi Zoltán tudományos munkatárs, Szűcs Renáta vezető kutató Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Nonprofit Kft.: Motorhűtő ventilátor kiegyensúlyozatlanságának vizsgálata

9.45-10.00 Dr. Szávai Szabolcs osztályvezető, Dr. Kovács Sándor tudományos munkatárs Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Nonprofit Kft.: A csúszva-gördülő felületpárok károsodását leíró lokális modellek kritikai elemzése

10.00-10.15 Szirbik Sándor, PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet: Hiperszinguláris integrálegyenletek elsőrendű feszültségfüggvényekkel L alakú ortotrop test peremén végzett feszültségszámításra

10.15-10.30 Dr. Dömötör Csaba egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet: Ipari termék- és formatervező mérnök hallgatók kiállításának szervezési tapasztalatai

10.30-10.45 Fodor Lóránt DLA BME Gép- és Terméktervezés Tanszék: Ipari formatervező a termékfejlesztési team-munkában

10.45-11.00 Debreczeni Dániel PhD hallgató, Dr. Kamondi László címzetes egyetemi tanár Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet:

Zahnfedersteifigkeits- und Verformungsberechnung bei evolventisch-aussenverzahnten, zylindrischen Zahnradpaaren

11.00-11.15 Sipkás Vivien PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet, Vadász Dr. Bognár Gabriella egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet: Micro switch failure analysis

11.15-11.30 Suriné Lengyel Veronika tanszéki mérnök Soproni Egyetem: TPM vs. Ipar 4.0 – anomália vagy lehetőség?

11.30-11.45 Mohamad Barhm Abdullah PhD hallgató, Dr. Jálics Károly egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet: 1D and 3D modelling of modern exhaust manifold

11.45-12.00 Alsarayefi Saad Jabber Nazal PhD hallgató, Dr. Jálics Károly egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet: Failure detection of fibre reinforced plastic component with acoustic methods

12.00-12.15 Haidar Faisal Helal Mobark PhD student University of Miskolc Institute of Materials Science and Technology, Dr. János Lukács Professor University of Miskolc Institute of Materials Science and Technology: HCF design curves for high strength steel welded joints

12.15-12.30 Tóth Sándor Gergő PhD hallgató, Tóth Dániel tanársegéd, Dr. Takács György egyetemi docens, Dr. Szilágyi Attila egyetemi docens ME Szerszámgépek Intézeti Tanszéke: Tóth Sándor Gergő PhD hallgató, Tóth Dániel tanársegéd, Dr. Takács György egyetemi docens, Dr. Szilágyi Attila egyetemi docens ME Szerszámgépek Intézeti Tanszéke: Current development focuses of the hydrostatic bearing design and optimization

II. SZEKCIÓ, I. EMELET, NAGYTEREM 2018. NOVEMBER 9. (PÉNTEK) DÉLELŐTT 9.00-TÓL

Szekcióvezető: Dr. Bihari Zoltán egyetemi docens, Dr. Jálics Károly c. egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

9.00-9.20 Kugler Gergely BSc gépészmérnök hallgató, Miskolci Egyetem, Dr. Bihari Zoltán egyetemi docens, Miskolci Egyetem: CNC vezérelt lézer gravírozó komplex tervezése

9.20-9.40 Simon Krisztián BSc gépészmérnök hallgató Miskolci Egyetem, Tóbis Zsolt mesteroktató, Miskolci Egyetem: Élelmiszeripari daráló berendezés fejlesztése

9.40-10.00 Marada Imre BSc gépészmérnök hallgató Miskolci Egyetem, Dr. Bihari János egyetemi docens, Miskolci Egyetem: Pneumobil hajtómű tervezése

10.00-10.20 Bódi Máté BSc gépészmérnök hallgató Miskolci Egyetem, Dr. Szabó J. Ferenc egyetemi docens, Miskolci Egyetem: Személygépkocsi jobb mellső futóművének végelelem vizsgálata, kátyúba hajtás esetén

10.20-10.40 Klecskó Szimonetta hallgató, Kun Patrik hallgató, Ábrám Tibor iskolaigazgató fizika tanár, Lévy József Református Gimnázium és Diákotthon, Miskolc: Miért is nem magyar találmány a radar? – Csorba György élete és munkássága

10.40-11.00 Magyar Balázs BSc formatervező mérnök hallgató Miskolci Egyetem: Számítógépház tervezése

11.00-11.20 Orosz Adrián BSc gépészmérnök hallgató, Dr. Kamondi László c. egyetemi tanár, Miskolci Egyetem: Kézi hajtású háztartási aprító tervezése

11.20-11.40 Kmetz Barbara, BSc formatervező mérnök hallgató, Miskolci Egyetem, Dr. Kamondi László c. egyetemi tanár, Miskolci Egyetem: A kézprotézisek fejlesztésének lehetőségei

11.40-12.00 Kocsis Gergő, BSc gépészmérnök hallgató, Miskolci Egyetem, Jálics Károly c. egyetemi docens, Miskolci Egyetem: A fejlődés útja az önműködő kézifegyverekig

12.00-12.20 Papp Szonja BSc gépészmérnök hallgató, Miskolci Egyetem: Kenőolajok tulajdonságai és vizsgálatauk

12.30 Összefoglalás. A Géptervezők és Termékfejlesztők XXXIV. Szemináriumának bezárása

A GÉPTERVEZŐK ÉS TERMÉKFEJLESZTŐK XXXIV. SZEMINÁRIUMÁNAK SZERVEZŐI:

Vadász Dr. Prof. Dr. Bognár Gabriella
az MTA doktora, habil intézetigazgató

Dr. habil. Döbröczeni Ádám egyetemi tanár, professor emeritus
Dr. Péter József c. egyetemi tanár, a szeminárium titkára
Németh Géza egyetemi adjunktus
Gere Aranka intézeti ügyintéző

KORÁBBI RENDEZVÉNYEINK:

Vezető Konstruktőrök Tanácskozása
Miskolc, 1973. augusztus 23 - 24.

Vezető Konstruktőrök Tanácskozása
Miskolc, 1975. július 23 - 24.

Géptervezők III. Országos Szeminárium
Miskolc, 1977. augusztus 30 - szeptember 1.

Géptervezők IV. Országos Szeminárium
Miskolc, 1980. augusztus 26 - 27.

Géptervezők V. Országos Szeminárium
Miskolc, 1982. augusztus 25 - 26.

Géptervezők VI. Országos Szeminárium
Miskolc, 1985. április 11 - 12

Géptervezők VII. Országos Szeminárium
Miskolc, 1989. május 29 - 31.

Géptervezők VIII. Országos Szeminárium
Miskolc, 1991. május 29 - 30.

Géptervezők IX. Országos Szeminárium
Miskolc, 1993. szeptember 30 - október 1.

Géptervezés ,94 (Géptervezők X. Országos Szeminárium)
Miskolc, 1994. május 20.

Géptervezők XI. Országos Szeminárium
Miskolc, 1995. május 29-30.

Géptervezés-termékfejlesztés ,96 (Géptervezők és
Termékfejlesztők XII. Országos Szeminárium),
Miskolc, 1996. május 24-25.

Géptervezők és Termékfejlesztők XIII. Országos Szeminárium,
Miskolc, 1997. november 28.

Géptervezők és Termékfejlesztők XIV. Országos Szeminárium,
Miskolc, 1998. december 15.

Géptervezők és Termékfejlesztők XV. Országos Szeminárium,
Miskolc, 1999. szeptember 30-október 1.

Géptervezők és Termékfejlesztők XVI. Országos Szeminárium,
Miskolc, 2000. november 15 - 16.

Géptervezők és Termékfejlesztők XVII. Országos Szeminárium,
Miskolc, 2001. november 8 - 9.

Géptervezők és Termékfejlesztők XVIII. Országos Szeminárium,
Miskolc, 2002. november 7 - 8.

Géptervezők és Termékfejlesztők XIX. Országos Szeminárium,
Miskolc, 2003. november 6 - 7.

Géptervezők és Termékfejlesztők XX. Országos Szeminárium
Miskolc, 2004. november 11 - 12.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXI. Országos Szeminárium
Miskolc, 2005. november 10 - 11.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXII. Országos Szeminárium
2006. november 9 - 10.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXIII. Országos Szeminárium
2007. november 15 - 16.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXIV. Országos Szeminárium
2008. november 13 - 14.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXV. Országos Szeminárium
2009. november 5 - 6.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXVI. Országos Szeminárium
2010. november 11-12.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXVII. Országos Szeminárium
2011. november 10-11.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXVIII. Országos Szeminárium
2012. november 8-9.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXIX. Országos Szeminárium
2013. november 7-8.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXX. Országos Szeminárium
2014. november 6-7.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXXI. Országos Szeminárium
2015. november 5-6.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXXII. Országos Szeminárium
2016. november 10-11.

Géptervezők és Termékfejlesztők XXXIII. Országos Szeminárium
2017. november 9-10.

GÉPTERVEZŐK ÉS TERMÉKFEJLESZTŐK XXXIV. SZEMINÁRIUMA

**Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet
H-3515 MISKOLC-EGYETEMVÁROS
Telefon/Fax: (0036)-46-327 643
E-mail: machpj@uni-miskolc.hu**

