

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA



2023/2-3.

nka
Nemzeti Kulturális Alap

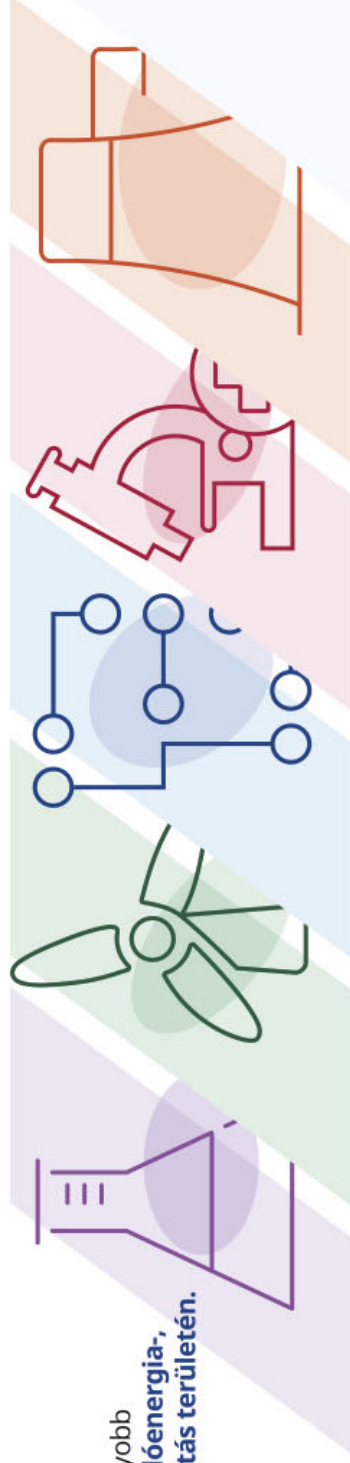
86 oldal
LXXIV. évfolyam

AZ EMERSON ÚJRADEFINIÁLJA, HOGYAN HOZZUK MOZGÁSBA A VILÁGOT SZOFTVEREINK ÉS TECHNOLÓGIÁINK A MODERN ÉLET MOZGATÓRUGÓI



HATÁSUNK A VILÁGRA

Vezető szoftver- és vezérlőtechnológiáink, valamint intelligens eszközeink a világ legnagyobb vállalatait támogatják az **energia- és megújulóenergia-, a vegyi-, valamint a hibrid- és diszkrét gyártás területén.**



AZ AUTOMATIZÁLÁS SZAKÉRTŐI VAGYUNK VILÁGSZERTE, AKIK...



Energiaoptimalizálással segítik a Colgate termékek előállítását.



Lehetővé teszik a Mitsubishi Power számára a világ legnagyobb zöld hidrogéngyártó és -tároló létesítményének automatizálását.



Növekszik a tiszta energiatermelés megbízhatóságát Alaszka északi részén.



Gyorsabban és biztonságosabban juttatják forgalomba a Parkinson-kór, az Alzheimer-kór, a reumás ízületi gyulladás, az asztma, a vesebetegség és a magas vérnyomás elleni gyógyszereket.



Lehetővé teszik a Novo Nordisk számára az inzulin gyors és biztonságos fejlesztését.



A biztonságos felhő-infrastruktúrán keresztül optimalizálják a Chevron működését.



A digitális átalakulás révén optimalizálják a sörgyártást a sörfőzdék új generációja számára.



Napi 12 milliárd gallon észak-amerikai víz és szennyvíz kezelését automatizálják.

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

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

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczöni Ádám

elnök

Vesza József

főszerkesztő

Dr. Jármái Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

főszerkesztő-helyettesek

Dr. Barkóczi István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. 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

TISZTELT OLVASÓ!

Az Emerson egy globális technológiai és szoftvercég, amely innovatív megoldásokat kínál a világ alapvető iparágai számára. Az Emerson egri gyára egyik erős pillére mind a magyar pneumatika gyártásnak, mind az Emerson Discrete Automation üzletágának. Mindig nagy hangsúlyt fordított a magas színvonalon képzett, tehetséges kollégák alkalmazására, hiszen ez az egyik fő biztosítéka a világszínvonalú működésnek. Az egyetemi hallgatókkal, oktatókkal való együttműködés fennállása óta fő tevékenység volt a vállalat életében.

A 2023 áprilisában hetedik alkalommal megtartott Agria Konferencia Sorozat, InnoVETAS2023 konferenciája egyik szép példája annak a kollaborációs folyamatnak, amelynek során az Emerson Automation FCP Kft. lehetőséget biztosít az egyetemi hallgatóknak, kutatóknak a legfrissebb kutatási eredményeinek bemutatására. A 2023-ban az InnoVETAS2023 konferencia kibővült az 1. Emerson Műszaki Játsszóter versennyel, annak zsűrizésével és díjátadójával. A műszaki tudományos előadások mellett a diákok által tervezett és készített eszközök tették színessé az eseményt.

Az InnoVETAS2023 konferencia plenáris ülésén az érdeklődők meghallgathatták Gödri István ügyvezető igazgató úr előadását az egri telephely helyzetéről. Kiemelte a konferencia fejlődésének ívét, amely még szorosabb együttműködést tesz lehetővé hallgatók és az Emerson között. Ezt követően Stéphanie De Boissieu az Emerson Gyártás Automatizálás Stratégia Üzleti Egységének alelnöke tartotta meg nyitóbeszédét. Az Emerson és az üzleti egység bemutatása mellett a mérnök hallgatókat segítette a vállalatok számára értékes készségek, képességek bemutatásával. Rámutatott a mérnöki tudás mellett a „soft skillek”, az együttműködés és a nyelvtudás fontosságára.

A konferencia folyamatosan növekvő előadó- és érdeklődő létszáma méltóan megmutatja az Agria Konferencia sorozat létjogosultságát és fontosságát a Magyarországon rendezett nemzetközi konferenciák között, valamint az oktatás és ipar együttműködésére jelentkező igény növekedését.

Dr. Soltész László

szervezőbizottság elnöke

Termékfejlesztési igazgató

Emerson Factory Automation

Prof. Dr. Pokorádi László

alapító elnök

Óbudai Egyetem

Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet

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

Telefon: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

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

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

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

Felelős kiadó: Dr. Bárdos Krisztina ügyvezető igazgató.

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

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

Előfizetésben megrendelhető az ország bármely postáján, a hírlapot kézbesítőknél, www.posta.hu WEBSHOP-ban (<https://eshop.posta.hu/storefront/>), e-mailen a hirlapelofizetes@posta.hu címen, telefonon +36-1-767-8262 számon, levélben a MP Zrt. 1900 Budapest címen. Külföldön terjeszti a Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14.

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

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

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

A megjelent cikkek lektoráltak.

A kiadvány a Nemzeti Kulturális Alap támogatásával jelenik meg.

TARTALOM

1. Bozay Péter, Prof. Dr. Jármai Károly, Dr. Virág Zoltán:

REZGÉSCSILLAPÍTÓ ANYAGOK VISELKEDESE

ALACSONY HŐMÉRSÉKLETEN6

A rezgéscsillapítás létfontosságú szerepet játszik a ciklikus terhelésekben. Jelentős számú különböző lengéscsillapító áll rendelkezésre. Anyagtulajdonságaik alacsony hőmérsékleten jelentősen megváltozhatnak. A kutatás célja a vászonbéléses gumipánt jellemző viselkedésének meghatározása. Meghatározzuk az anyag veszteségi tényezőjét különböző hőmérsékleteken, $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ között – a statikus és a dinamikus nyírási modulust is. A ciklikus terhelések és a rezgési frekvenciák változtatására a Brüel & Kjaer mérőeszközöket használjuk. Egy speciális hűtőszekrény állt rendelkezésre, amely $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig alacsony hőmérsékletet biztosít. A mérések szövetből készült szállítószalag próbatestekkel történtek.

2. Marada Imre, Dr. Bihari János:

BERENDEZÉS A MŰANYAG KIS

KERESÉSEK HIBA ELEMZÉSÉRE12

A kisméretű műanyag fogaskerekek esetében, a gyártási mennyiség és a gyártási folyamatok erősen korlátozzák a hibák észlelésére használható módszerek számát. Ezért, különösen fontos a fogaskerekek tengelyein is jelenlévő, észlelhető és mérhető hibák okozta jelenségek megértése. A forgási jellemzők közül a bemeneti oldali nyomatók mérése a leggyakrabban elterjedt vizsgálati módszer a fogaskerekes hajtásoknál, különösen a kúpfogaskerekekénél. Ez a módszer alkalmas kis fogaskerekes sebességváltók egyes hibáinak felderítésére, valamint a hibák hatásainak és a gyártási jellemzők megkülönböztetésére is. Ebben a kutatásban egy olyan mérésorozat alapjait és berendezését hoztuk létre, amelyek segítségével a korábban ismertnél pontosabb információk gyűjthetők, és a kisméretű műanyag fogaskerekek hibáinak hatását is megérthetjük.

3. Domokos Tatiane, Baksa Atilla, Szávai Szabolcs:

FLD GURSON FÉMMEL

EGYSZERŰ LAPOS MINTÁHOZ16

A múltban a fémanyagok képlékeny károsodásának és törésének előrejelzése összetett terhelések esetén fontos téma volt az olyan iparágakban, mint a fémalakító ipar. A GTN, az egyik legklasszikusabb sérülésmodell sérülésmechanikai szempontból, amely széles körben alkalmazható és tökéletes evolúcióval rendelkezik a képlékeny fémek törésének vizsgálatában. A GTN Gursontól származik, majd később Tvergaard és Needleman fejlesztette tovább. A fejlesztés abból áll, hogy egy ekvivalens f üregtérfogatot és két további q_1 és q_2 paramétert iktatunk be a Gurson-modell hozamfüggvényébe, hogy modellezzük a teherbíró képesség teljes elvesztését egy reális üregtérfogat hányaddal.

4. Petrik Máté, Bolló Betti, Jármai Károly:

TEHERGÉPKOCSI TARTÁLYÁNAK

TŰZVÉDELMI TERVEZÉSE

KÖZÜTI BALESET ESETÉN20

A kutatás középpontjában a különböző folyadékokat tartalmazó tehergépkocsi tartályának tűzállósági idejének meghatározása áll egy közúti baleset esetén. A tartály falának anyaga és falvastagsága jelentős hatással van a tűzállóságra. A hőfelszabadulási sebességtől függően a folyamat nagyon gyors lehet. Az adott tartályméretekre elvégezzük a számításokat, és megpróbáljuk optimalizálni a tartályt a szükséges R30, illetve R45 tűzállósági időre.

A vizsgálat tárgyát képező tartályok nem sorolhatók a klasszikus nyomástartó edények közé, annak ellenére, hogy a hengeres héjban lévő nyomás alatti folyadék nyomást gyakorol a tartály falára. A különbözőség oka, a jármű haladásából eredő dinamikus és fásasztó terhelés. Egy ilyen tartályban keletkező tűz esetén, jellemzően két

probléma merülhet fel. Gyúlékony folyadék szállítása esetén a tűz hatására a tartályban megnőhet a nyomás, ami a tartály felhasadásához vezethet. Ez biztonsági berendezéssel elkerülhető, de BLEVE jelenség léphet fel, ha a tartály túl sokáig a tűzhatás alatt marad. Szilárd szemcsés anyagok szállítása esetén a közeg kevésbé képes a hő elvezetésére, így a tartály meggyengülhet a súlyterhelés alatt, ami szintén meghibásodáshoz vezethet. Ha a szemcsés anyag éghető, még súlyosabb tűz alakulhat ki.

5. Dr. Bihari János, Marada Imre:

FDM NYOMTATÁSSAL KÉSZÍTETT

MŰANYAG ALKATRÉSZEK CSAVAROS

CSATLAKOZÁSÁNAK VIZSGÁLATA26

Az FDM- és MSLA-nyomtatást már nem csak prototípus-készítési eszközként használják, hanem számos működő alkatrész előállítható ezekkel a gyártási technológiákkal. Az ilyen típusú alkatrészek mechanikai tulajdonságai számos tényezőtől függenek, és nem határozhatók meg olyan egyértelműen, mint például a fröccsöntött alkatrészek esetében. Mivel az alkatrészek rögzítése gyakran csavarokötéssel történik, fontos tudni, hogy a különböző anyagokhoz, különböző síkban és különböző töltési arányokkal milyen meghúzási nyomatókat és szorítóerőket kell alkalmazni. Ebben a kutatásban arra a kérdésre kerestük a választ, hogy milyen szorítóerők érhetők el az FDM nyomtatott alkatrészekben különböző kialakítású menetes csatlakozásokkal.

6. Dr. Bencs Péter:

BUSZ HŰTÉSI RENDSZEREK ÁTTEKINTÉSE

AZ ÁTALAKÍTÁSI FOLYAMATBAN30

A kutatás elsődleges célja, egy városi személybusz motorhűtő és akkumulátor üzem (elektromos hajtású) hűtési/fűtési megoldásainak vizsgálata. Általános szakirodalmi áttekintést végeztünk a méretezési folyamat során várható hőteljesítmény értékelésére. Szakirodalmi összefüggésben egy elektromos átalakítást is megvizsgáltuk, hogy milyen hűtőrendszert alkalmaznak a belső égésű motorokhoz, milyen rendszert cserélnék, és milyen megoldást alkalmaznak. A kutatás keretében a feladatban meghatározott autóbusszra (városi személybusszra) próbáltunk konkrét hőteljesítmény értékeket találni. A kutatás következő lépése a belső égésű motorok hűtésére használt módszerek feltárása volt. A szakirodalmi áttekintés utolsó lépéseként az elektromos átalakítás során használt akkumulátorcsomagok hűtési és fűtési megoldásait vettük figyelembe (az akkumulátorcsomagok optimális hőmérséklet-tartományának megőrzése).

7. Molnár Tamás Géza, Zsótér Brigitta:

3D NYOMTATOTT IPARI MŰANYAGOK

ANYAGVIZSGÁLATA

A MŰSZAKI GYAKORLATBAN35

Kutatásunk a 3D nyomtatásra és a nyomtatott műanyag alkatrészek mechanikai jellemzőire irányult, egyúttal annak műszaki alkalmazási lehetőségeit vizsgáltuk. Különböző készletekből különböző nyomdai technológiájú szakadáspróba mintákat használtunk, a nyomtatási paramétereken is változtatva. A kész ISO műanyag tesztesteket az 527 szabvány szerint húzva, szakítási vizsgálatnak vetettük alá. Összehasonlítottuk a készleteredmény-vizsgálatokat a fröccsöntött termékek szakadási jellemzőivel, amelyek átlagosan 25-35%-kal alacsonyabbak a 3D nyomtatott minták esetében. A fröccsöntéshez viszonyított termelékenység különbségek kevésbé aggasztóak, mivel a 3D nyomtatási technológiával szabadon alakíthatók a különféle formák és prototípusok, elsősorban kis szériás vagy kereskedelmi tesztgyártásban. Ebben az esetben a 3D megfelelő megoldást ad. Az összegyűjtött eredmények, alapul szolgálnak a tervezett komponensek nyomtatásához, modellezéséhez és méretezéséhez.

8. Dr. Jármai Károly:

TÖMEG, KÖLTSÉG ÉS KÖRNYEZETI
HATÁS MINIMÁLÁSA HEGESZTETT

ACÉLSZERKEZETEKNEEL46

Az optimalás segítségével vizsgáljuk a tervezés és a gyártástechnológia, valamint a gazdaságosság kapcsolatát. Ez a három elem együttesen segít kiválasztani a legjobb lehetőséget. A szerkezeti megközelítés csak azokat a költségelemeket veszi figyelembe, amelyek közvetlenül kapcsolódnak a szerkezeti méretekhez. Egy valós szerkezet költségfüggvénye tartalmazhat anyagköltségeket, összeszerelési költségeket és egyéb gyártási költségeket, például hegesztési, felület-előkészítési, festési, vágási, élköszörülés és geometria-alakítási költségeket.

A tömegcsökkenés önmagában is csökkenti a globális környezeti hatásokat, mint a Globális felmelegedési potenciál (GWP), Ózonlebontási potenciál (ODP), a Savasodási potenciál (AP), az Eutrofizációs potenciál (EP), a Fotokémiai ózonképződési potenciál (POCP), valamint az Abiotikus kimerülési potenciál. A hegesztés vonatkozásában a különböző hegesztőhuzalok felhasználásával történő gyártás során adódó gáz kibocsátások különbözők. Például fémmagos huzal, valamint az önvédő porbeles huzal esetén eltérő a szén-monoxid (CO), a szén-dioxid (CO₂) és a kén-dioxid (SO₂) gázok mennyisége, így környezeti hatása is.

9. Kónya Gábor, Kovács Zsolt Ferenc:

NIKKEL-BÁZISÚ SZUPERÖTVÖZETEK
FORGÁCSOLHATÓSÁGÁNAK

PROBLÉMAKÖRE54

Ebben a cikkben tárgyaljuk a nikkell alapú szuperötvözetek megmunkálhatóságának problémáit, azt, hogy miért olyan nehéz ezeknek az anyagoknak a megmunkálhatósága, valamint a K+F jelentőségét az ipar számára. Ezek a szuperötvözetek a legnehezebben megmunkálható anyagok közé tartoznak, és széles körben használják gázturbinák nyersanyagaként a repülőgépiparban és az energiaiparban. Az iparági tapasztalatok alapján a horonymarás okozza a legnagyobb problémát, gyakori a szerszámkopás és a törések. A nagy termikus szilárdság és keménység miatt a vágási zóna nagy nyírófeszültségnek van kitéve, ami megnövekszik a forgácsolási erők és a vágási hőmérsékletek miatt, ami az anyag rendkívül rossz hővezető képessége miatt a szerszám élet is megterheli. Ebben a cikkben röviden összefoglaljuk, miért olyan nehéz ezeknek az anyagoknak a megmunkálhatósága, mely adatok befolyásolják a szerszám élettartamát. Kutatásunk alapján bemutattuk a szerszám pályák és a hűtési-kenési folyamatok hatását a forgácsolószerszám élettartamára.

10. Seif Eddine Habbachi, Attila Baksa, Marwen Habbachi:

A TRANSZVERZÁLIS LAPRUGÓ NUMERIKUS

MODELLEZÉSE ACÉL ANYAGGAL62

Az autó futóművek (rugók, lengéscsillapítók, összekötőelemek) egyre fontosabbá válnak a mai világban, mivel hozzájárulnak az autó kezelhetőségéhez és fékezéséhez, védelmet nyújtanak magának a járműnek, valamint megvédik a rakományt vagy csomagokat a károsodástól és a kopástól. Emellett a futómű rendszereknek sok funkciója van, például megvédik a járműtestet és a vázat az üthibaktól, biztosítják a stabilitást, és kényelmet. Közben azonban ezen felfüggesztő berendezéseknek alacsonyabb súlyúnak, maximális deformációs képességűnek, alacsony karbantartási igényűnek és üzemeltetési költségűnek kell lenniük. Ebben a cikkben csak a laprugós felfüggesztés típusára, pontosabban a keresztirányú laprugóra összpontosítunk. A projektünk célja a keresztirányú laprugó numerikus modellezése a véges elem módszer segítségével annak érdekében, hogy megvizsgáljuk a maximális deformációt és a feszültségeloszlást a rugalmas testben a két közös függőleges és szimmetrikus

merevségi konfigurációval, majd összehasonlítjuk az eredményeket az elméleti modellel és az Iveco vállalatától kapott adatokkal, hogy validáljuk azokat. Végül egy fontos összehasonlítást mutattunk be a numerikus eredmények és a kapott adatok között. A kapott eredmények azt mutatják, hogy a terhelés alatt álló szerkezet biztonságos.

11. Pokorádi László:

JAVÍTÁSI MUNKIGÉNY BECSLÉSÉNEK
MONTE-CARLO SZIMULÁCIÓS

BIZONYTALANSÁGI ELEMZÉSE67

A karbantartás a gyakorlati mérnöki munka egyik legfontosabb területe. Matematikai szempontból a termelőberendezések üzemeltetése egy diszkrét állapotterben zajló, utóhatások nélküli sztochasztikus folyamat, más szóval Markov-lánc. A dolgozat célja, hogy megvitatassa a javítási folyamatok Monte-Carlo szimulációja felhasználási lehetőségeit, bemutassa a szükséges karbantartási kapacitás meghatározását. A javasolt módszer alkalmazhatóságát egy hegesztőcella szükséges karbantartási kapacitásának meghatározásán keresztül mutatjuk be, a megengedhető becslési bizonytalanság függvényében.

12. TANOUCAST Aimen, HRICZÓ Krisztián:

A NANOFLUID ÁRAMLÁSÁNAK NUMERIKUS
SZIMULÁLÁSA HULLÁLT CSATORNÁN KERESZTÜL

ÖRVÉNYGENERÁTORRAL72

A hűtő fontos része az autónak, amely közvetett hőcserével, hűtőfolyadék keringtetésével hűti a jármű különböző részeit. A hőátadás feltételei az áramlási, geometriai és hőmérsékleti jellemzők függvényei. Jelen munka kétdimenziós turbulens áramlás numerikus vizsgálatára vonatkozik, hullámcsatornában hőátadással, örvénygenerátorral és anélkül, Al₂O₃-víz nanofluid hűtőadók alkalmazásával. Az áramlás irányadó egyenlete a folytonossági egyenlet, az impulzusegyenlet és a hőátadást modellező energiaegyenlet. Ezt a parciális differenciálegyenlet-rendszert az Ansys-Fluent kereskedelmi szoftverrel, véges térfogatú módszerrel diszkrétizáltuk és oldottuk meg. A standard k-ε modellt használtuk a turbulencia modellezésére.

Elemeztük a paraméterek és az örvénygenerátorok hatását a megoldásokra. A kapott eredményeket grafikusán ábrázoltuk.

13. Bodnár Dávid, Jármai Károly:

ROBOTOK MUNKATERÜLETÉNEK ÉS

SZERKEZETÉNEK TERVEZÉSE, ÁTTEKINTÉS78

A robotok alkalmazása, különböző feladatokra, folyamatosan növekszik. A lehetséges kutatási irányok azonosítása érdekében ez a tanulmány az ipari vagy orvosi alkalmazásokban alkalmazott robotok munkaterület-, élettartam- és szerkezetoptimalásban elért eredményeket kívánja áttekinteni. Az orvosi alkalmazásokat azért vesszük figyelembe, mert a hagyományos műtéti módszerekhez képest, javítható a pontosság és az irányítás, valamint csökkenthető az invazivitás. Ez az áttekintés, a témával kapcsolatos jövőbeli kutatások alapját képezi, meghatározva a lehetséges kutatási irányokat, az áttekintett algoritmusok és technikák felhasználásával. A hangsúly, a munkaterület- és szerkezetoptimaláson van, a költséghatékonyság szem előtt tartásával.

A GÉP jelenlegi számában szereplő cikkek két-két szakmai bírálóhoz kerültek véleményezésre. A bírálók a következők voltak (a cikkek megnevezése nélkül):

Bodnár Dávid • Nagy Szilárd • Orbán Ferenc • Szirbik Sándor •
Hanka László • Máté Márton • Tolvaly-Roşca Ferenc •
Pokorádi László • Virág Zoltán • Koós Dániel

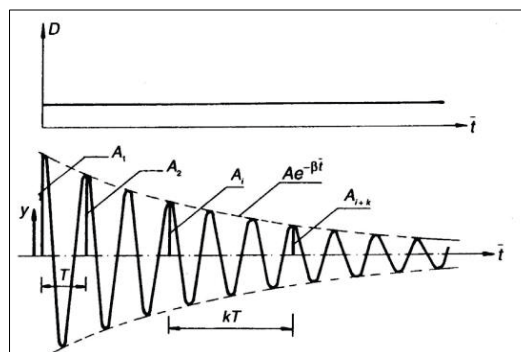
REZGÉSCSILLAPÍTÓ ANYAGOK VISELKEDÉSE ALACSONY HŐMÉRSÉKLETEN

VIBRATION DAMPING MATERIAL BEHAVIOUR AT LOW TEMPERATURE

Bozzay Péter*, Prof. Dr. Jármay Károly**, Dr. Virág Zoltán***

ABSTRACT

Vibration damping plays a vital role in cyclic loadings. There are a significant number of different dampers available. Their material properties can change significantly at low temperatures. The research aims to determine the characteristic behaviours of a rubber strap with canvas linings. We determine the loss factor of the material at different temperatures between $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ —also the static and the dynamic shear modulus. We use the Brüel & Kjaer measuring devices to change the cyclic loadings and the vibration frequencies. A special refrigerator is available to provide low temperatures down to $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. The measurements were made using fabric conveyor belt specimens.



1. ábra, Szabad rezgés konstans csillapítás mellett

1. BEVEZETÉS

A rezgések az esetek döntő többségében valamilyen berendezés üzemeltetése során keletkező ciklikus, dinamikus hatások okozta járulékos, nemkívánatos jelenségek, amelyek jellegüktől és intenzitásuktól függően idővel kedvezőtlen hatással lehetnek magára a berendezésre, a környezetére és akár az ott tartózkodó emberekre is. Ebből kifolyólag a rezgéscsillapítás nagyon fontos szerepet játszik akár ciklikus, akár impulzusszerű terhelések ilyen kedvezőtlen hatásainak csökkentésében, ideális esetben megszüntetésében.

Különösen intenzív, akár destruktív hatásokat okozhat a rezonancia jelensége. Minden berendezés rendelkezik egy vagy több, a szerkezeti kialakítására, anyagminőségére jellemző sajátfrekvenciával. Gerjesztés hatására a szerkezeti elemek rezgésbe jönnek és ezek a sajátfrekvenciák lesznek a spektrum azon részei, amelyek domináns kiemelkedő rezgésszinteket mutatnak, illetve a gerjesztés megszüntetése után a leghosszabb idő alatt csillapodnak le teljesen. Lényegében ezeken a frekvenciákon lehet a legkisebb gerjesztési energiával a legnagyobb hatást elérni. A gerjesztés megszűntetése utáni szabad – sajátfrekvenciájú – rezgés csillapításának jellemzője a logaritmusos dekrementum (δ), amely két egymást követő amplitúdó hányadosának viszonyozása. Konstans csillapítás mellett az 1. ábra szerint. [1]

Általánosítva

$$\delta = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{A_i}{A_{i+k}} \quad (1)$$

A csillapítási tényező

$$\eta = \frac{\delta}{\pi} \quad (2)$$

Ha a sajátfrekvenciának megfelelő gerjesztést folyamatosan fenntartjuk és a gerjesztő jel fázisa – konstans amplitúdó mellett – megfelelően viszonyul a már rezgő szerkezeti elem mozgásfázisához, akkor annak amplitúdóját öngerjesztő folyamatként fokozatosan tovább növeli (2. ábra), rezonancia jelensége lép fel, amely mértékének csak a szerkezetre jellemző csillapítás szab határt. Elméleti szélső esetben, ha ez a csillapítás nulla, akkor a rezgés amplitúdója végtelen nagyságú, végtelen csillapítás esetén pedig nulla. A gyakorlatban ez jellemezhető a rezonancia-nagyítással (ν), amit a gerjesztő jel (A_g) és a válaszjel (A_v) nagyságának aránya ad meg. [2]

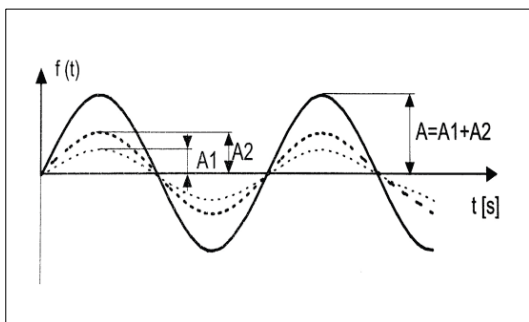
$$\nu = \left| \frac{A_v}{A_g} \right| \quad (3)$$

ahol rezonancia esetén $\nu \gg 1$

* tanszéki mérnök, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

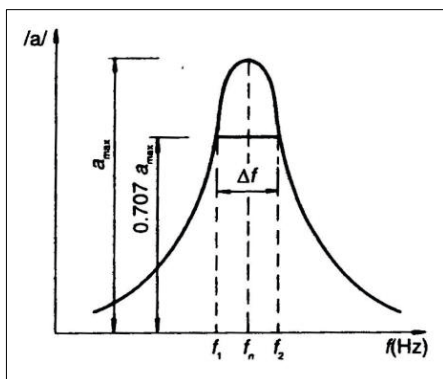
*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Bányászati és Energia Intézet



2. ábra, Egyirányú harmonikus rezgésen erősítése

Hogy a gyakorlatban egy adott gerjesztés hatására végül mekkora maximális rezgésamplitúdó keletkezik, azt a szerkezetre jellemző csillapítási tulajdonságok korlátozzák. A csillapítás mértékének számszerűsítésére többféle módszer áll rendelkezésre, ezek közül a vizsgálatok során az Oberst-féle módszert alkalmazzuk. Ez esetben a csillapítási tényező értékét a rezonancia frekvencia (f_n) és az ehhez tartozó amplitúdóhoz (a_{max}) képest 3 dB csillapítású ($1/\sqrt{2}=0,707$ -szeres, félteljesítményű) frekvenciaértékek (f_1 és f_2) különbségének aránya adja meg (3. ábra). [1]

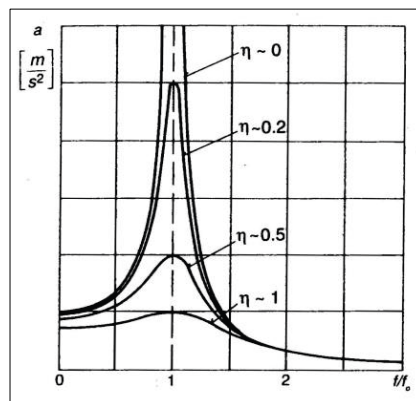
$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_n} = \frac{\Delta f}{f_n} \quad (4)$$



3. ábra, Csillapítási tényező Oberst alapján

Ha a gerjesztett rezgés mértéke a megengedhetőhöz képest túlságosan nagy, akkor rezgés csillapítás alkalmazása szükséges, akár a rezonancia, akár az azon kívül eső frekvenciatartományokban. Erre számos lehetőség áll rendelkezésre, mint például:

- (váz)szerkezet konstrukciós és anyagszerkezeti kialakítása,
- forgógép hajtásának mechanikai és villamos kialakítása,
- csillapító eszközök beépítése (rugók, lengéscsillapítók, tömegek, stb.),
- csillapító anyagok alkalmazása (gumik, habok, kompozitok, stb).



4. ábra, Rezonancia görbék különböző csillapítási tényezőknél

A 4. ábra szerint η minél nagyobb értéke kívánatos a rezonancia nemkívánatos hatásainak elkerüléséhez.

2. A GUMIHEVEDER VIZSGÁLATA

E kutatás célja az adott csillapítás hőmérsékletfüggésének vizsgálata, mely a felsoroltak közül elsősorban a csillapító anyagokra vonatkozatható, mivel ezek anyagszerkezeti tulajdonságai szélsőséges hőmérsékleteken jelentősen megváltozhatnak. Ezt figyelembe kell venni, ha a csillapított szerkezet például extrém hideg téli klímájú vidéken, vagy repüléstechnikában kerül alkalmazásra.

Más megközelítésből e kutatás célja jelenleg az, hogy a rendelkezésünkre álló eszközrendszerrel kidolgozzuk a szükséges vizsgálati módszert és ezt a gyakorlatban teszteljük. Így ebben a fázisban még nem elsősorban az eredményeknek a vizsgált anyagra vonatkoztatott abszolút tudományos precizitása a cél, hanem a tapasztalatszerzés a módszer, a gerjesztő- és adatgyűjtő eszközök, illetve a mérésiértékelő program alkalmazhatóságáról, beleértve a további fejlesztési lehetőségeket, igényeket is. A vizsgálat tárgya az EGK Kft által rendelkezésünkre bocsátott ENERGUM EP/630/4, 10+2 mm-es vászonbetétes szállítószalag hevederből (5. ábra) készült próbatest, melynek főbb tulajdonságait az 1. táblázat tartalmazza. [5]

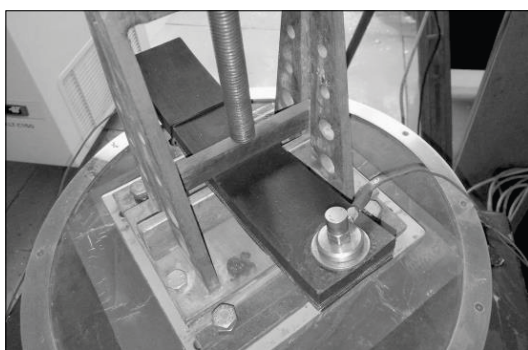


5. ábra, Energum EP/630/4 heveder keresztmetszete

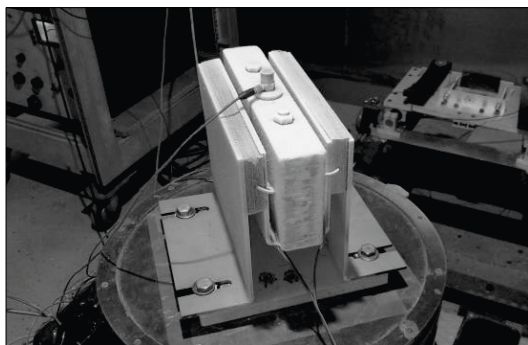
1. táblázat
Energum EP/630/4 heveder főbb jellemzői

Teljes vastagság	15,5 mm
Ebből a felső + alsó fedőrétegek	10 + 2 mm
Szövetbetét anyaga	EP 160 poliészter/poliamid
Üzemi hőmérséklet	-30...+80 °C
Tömeg	18,5 kg/m ²
Próbatest mérete	250 x 50 mm

Ezzel kétféle mérést végeztünk, egyik esetben egyszerűen csak magát a gumiheveder darabot befogva (ciklikus hajlító igénybevétel), másik esetben Jones-féle próbatestként (ciklikus nyíró igénybevétel), ezek a 6-7. ábrákon láthatók.



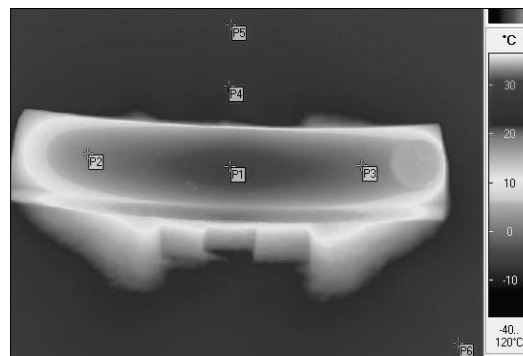
6. ábra, Egyszerű próbatest a shaker-en



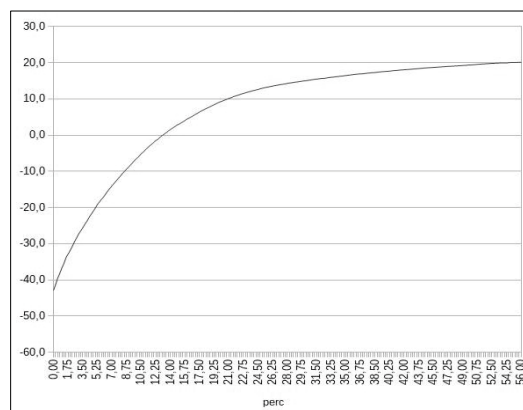
7. ábra, -40 °C fokos Jones próbatest a shaker-en

Próbatestek extrém lehűtéséhez egy VT147 típusú ultramélyhűtő áll rendelkezésünkre, amellyel -62 °C érhető el. Ezzel a vizsgálat jelenleg csak úgy történhet, hogy a próbatestet behelyezzük, lehűtjük, majd kivéve végezzük a gerjesztést és mérést, miközben az visszamelegszik a környezeti hőmérsékletre. Ez nem ideális, egyrészt mert a próbatest hőmérséklete teljes keresztmetszetében nem homogén változik (ezt hőkamerával vizsgáltuk, 8. ábra), másrészt a változás – hőelemmel adott pontban mérve – időben nem lineáris (9. ábra) és nem szabályozható, ugyanakkor a fenti alapvető

cél elérhető ezzel a módszerrel is. Ideális megoldás egy megfelelő klímakamra lenne, ami azonban jelen gazdasági helyzetben irreális beruházási költségekkel járna.



8. ábra, Egyszerű próbatest hőképe



9. ábra, Próbatest mérőpont hőmérséklet változása

A gerjesztés – jellegét tekintve – esetünkben háromféle módon történhet:

- **Impulzussal:** Speciális mérőkalapáccsal vizsgáljuk a próbatestre mért, ismert energiájú ütés hatására a rezgés lecsengését.
- **Színuszjellel:** Visszacsatolással a teljes frekvenciasávban biztosított konstans gyorsulás mellett, meghatározott paraméterek szerint változó frekvenciájú gerjesztés történik (sweep), azaz egy időpillanatban csak egyetlen frekvenciaérték hatását vizsgálunk. Ez a módszer ebben az esetben nem ideális, mert a hőmérséklet és frekvencia folytonos, adott időtényező szerinti (ráadásul a frekvencia esetében lineáris, míg a hőmérsékletnél nem lineáris) változása, illetve az így mérhető „frekvenciapontonként” minimálisan szükséges mintavételezési idő együttes feltételrendszerében a mérési eredmények tapasztalatunk szerint nem tudják a valós viselkedést megfelelően visszatükrözni (10. ábra).

- **Fehérzajjal:** A fehérzaj a vizsgált frekvenciaspektrum minden komponensét egyforma valószínűséggel tartalmazza, így ez megfeleltethető sok egyedi szinuszos gerjesztés összességének, de ebben az esetben egy attól lényegesen, akár nagyságrendileg rövidebb időtartam alatt. Ez a mérés közben viszonylag gyorsan változó hőmérséklet miatt alapvetően fontos szempont. Ugyanakkor e változás nemlinearitásának (a rövidebb mérési idő miatt) nincs számottevő hatása a végeredményre. Ebben az esetben visszacsatolás nélkül egy konstans gerjesztési jelszintet beállítva történik a mérés. Jelen esetben a rendelkezésre álló módszerek közül ez a legjobb.

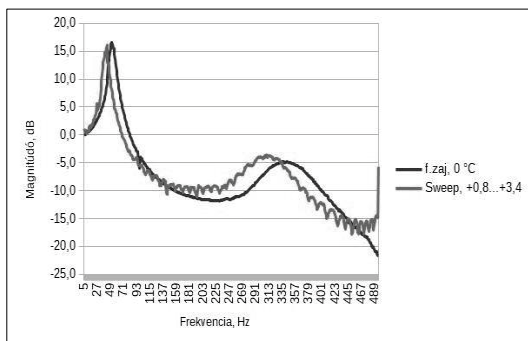
- Ennek meghajtásához B&K 2708 (1200 W-os) teljesítményerősítő.
- Fehérzaj előállításához a B&K 2034 spektrumelemző beépített jelgenerátora (szinuszjelhez B&K 1050 vezérlőgenerátor).
- Mérőműszerként NI cDAQ-9178 USB keretben NI-9234 gyorsulásmérő és NI-9219 hőmérsékletmérő modul, 2 db 100 mV/g érzékenyséű gyorsulásérzékelővel, illetve T típusú hőelemmel.
- Mérés adatgyűjtéshez NI SignalExpress szoftver
- Mérés kiértékeléshez Octave (a feladat szempontjából Matlab kompatibilis) szoftver

3. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

A gerjesztés mindkét fajta próbatetest esetében a fentiek szerint, fehérzajjal történt (próbaképpen szinuszjellel is, de a kapott eredmények alapján ezt elvetettük a fentiek szerint). A mérésnél az egyik csatorna a gerjesztés (stimulus), a másik a válasz (response) gyorsulásértékét mérte, a SignalExpress-ben kialakított mérőprogram pedig 15 másodperces adatátlagolásokkal határozott meg egy-egy frekvenciaválasz spektrumot az 1...850 Hz frekvencia- és a kb. -60...+20 dB magnitúdó tartományban, amely az ahhoz tartozó mért hőmérséklettel együtt számítógépen külön-külön fájlokban rögzítésre került. [3]

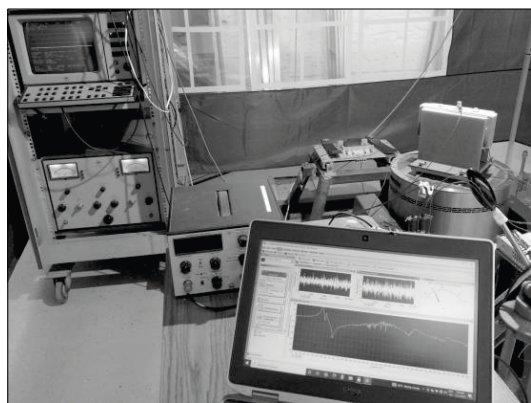
Mivel megfelelő klímakamrával (egyelőre) nem rendelkezünk, a hűtésből kivett próbatetest hőmérséklete a gyors rögzítés ellenére már növekedett, illetve aktív melegítés nélkül a környezeti hőmérséklet fölé nem melegedett (a cél alapvetően a hidegben történő viselkedés vizsgálata), így a lehetőségeinkből adódóan az egyszerű próbatestnél a bemutatott mérés esetében -43...+20 °C tartományban, a melegedés sebességéből adódóan kb. 1 óra időtartam alatt 225 fájlba rögzítve, míg a jóval nagyobb hőtehetetlenségű Jones próbatestnél kb. -53...+13 °C között, kb. 3 óra alatt és 674 fájlban tudtunk egy komplett mérést elvégezni, melyet az utóbbi esetben a shaker folyamatos üzem miatti túlzott melegedése és az alacsonyabb környezeti hőmérséklet is korlátozott.

Az egyszerű próbatetest mérési adatainak előzetes, még csak egyszerű táblázatkezelővel végzett vizsgálata (7 különböző hőmérsékleten) olyan eredményt mutatott, amely igazolta, hogy érdemes további elemzéseket



10. ábra, Fehérzaj és sweep eredmények összehasonlítása közel azonos hőmérsékleten

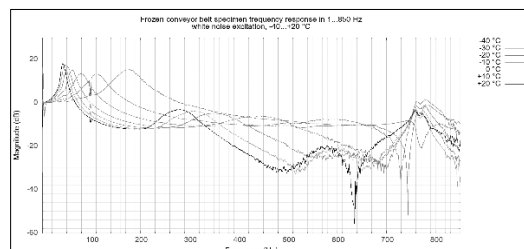
A gerjesztést egy nagy teljesítményű Brüel&Kjaer rázórendszer biztosítja, a mérésadatgyűjtést pedig egy National Instruments CompactDAQ rendszer, SignalExpress szoftverrel (11. ábra).



11. ábra, A B&K és NI gerjesztő-mérő rendszer

A főbb elemek jellemzői:

- B&K 4818 típusú, elektrodinamikus shaker: a teljes (rögzítőelemeket is tartalmazó) terheléssel >200 m/s² gyorsulás előállítására képes, ami bőven megfelel a tapasztalataink szerint ehhez a feladathoz elegendő 10-15 m/s²-hez. A shaker megfelelően kialakított rezgésmentes alapon áll.



12. ábra, Egyszerű próbatetest frekvenciaválasz diagramja különböző hőmérsékleteken

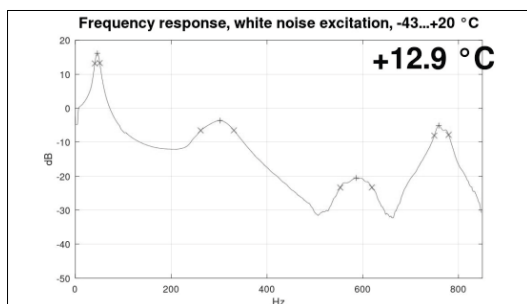
végezni. A 12. ábrán a próbatest frekvenciaválasz görbéje látható 7 különböző hőmérsékleten. Ez a diagram az a_g gerjesztő gyorsulásjel és a próbatest arra adott a_v válasz gyorsulásjel amplitúdójának viszonyát mutatja meg dB skálán a vizsgált frekvenciaspektrumban az alábbiak szerint:

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{a_v}{a_g}\right) \quad (5)$$

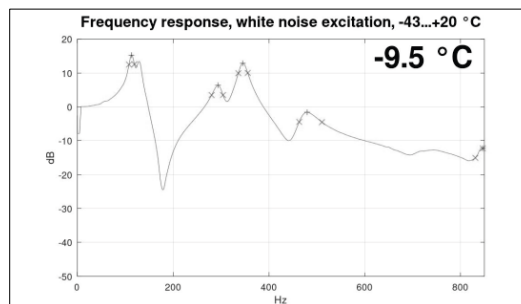
Ebből következően 0 dB esetén a gerjesztő- és a válaszeljel gyorsulás amplitúdója megegyezik, az ettől nagyobb értékek bizonyos mértékű rezonancia nagyítást jeleznek, a fentebb leírt csillapítási tényezőkkel, míg a 0 dB alatti értékek eleve csillapítást mutatnak a gerjesztő jelhez képest.

Jól megfigyelhető, hogy a hőmérséklet növekedésével az első két sajátfrekvencia jelentősen balra tolódik a spektrumban és magnitúdója valamelyest növekszik. A 100 Hz körüli, nem változó frekvenciájú „lyuk” a rendszer sajátossága, a shaker hűtőventilátorának rezgése okozza. A kb. 500 Hz feletti tartományban már a próbatest, a rögzítő szerkezet, a shaker és annak tartószerkezetének komplex viselkedése látszik, így itt a hőfokfüggés is kevésbé markáns és így a továbbiakban inkább csak az 500 Hz alatti tartományra fordítjuk a figyelmünket. A csillapítási tényező meghatározása (különösen a hőmérséklet függvényében) itt még hosszadalmas feladat lett volna, több száz fájl esetében pedig különösen az, így elkészült egy Octave (Matlab kompatibilis) program [4], amely automatikusan elvégzi:

- a fájlok egymás utáni beolvasását, és az egyes spektrum diagramok megjelenítését,
- a sajátfrekvencia csúcsok keresését és magnitúdójuk meghatározását,
- ezekből a 3 dB-es (félteljesítményű) sávzélességük meghatározását (13. és 14. ábra),
- ezekből az Oberst-féle csillapítási tényezők számítását,
- végül mindezen adatok fájlba mentését oly módon, hogy táblázatkezelőbe importálva tetszőleges további elemzéseket lehessen elvégezni rajtuk.



13. ábra, Egyszerű próbatest sajátfrekvenciái egy adott hőmérsékleten

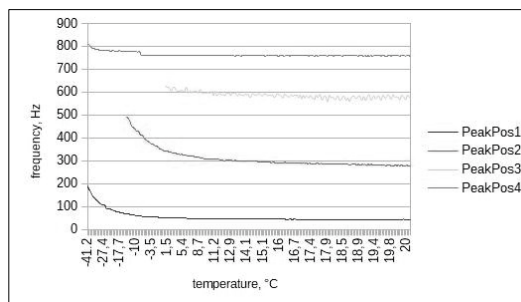


14. ábra, Jones próbatest sajátfrekvenciái egy adott hőmérsékleten

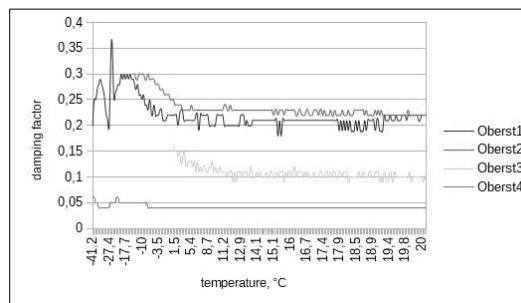
Ez alapján a sajátfrekvencia és a csillapítási tényező változása a hőmérséklet függvényében a 15-18. ábrákon látható. A diagramok hiányosságát az okozza, hogy az adott hőmérsékleten az adott sajátfrekvencia komponens amplitúdója nem éri el az Oberst-féle, 3 dB-nek megfelelő csúcsot, így azt a feldolgozó program nem veszi figyelembe, ahogy ez pl. a 14. ábra 600-800 Hz tartományában látható.

A hőmérséklettel időben változó frekvencia spektrum görbék sorozatából készült videó animáció is, amely nagyon szemléletesen teszi ezt a változást, ez az alábbi linken tekinthető meg:

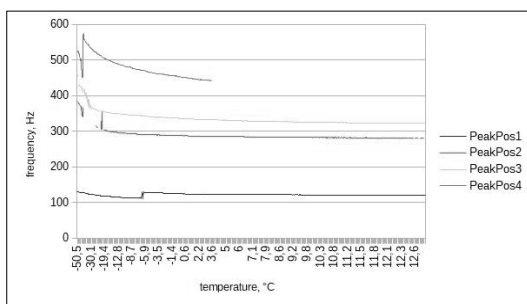
<https://www.youtube.com/watch?v=H396SwHzJV0>



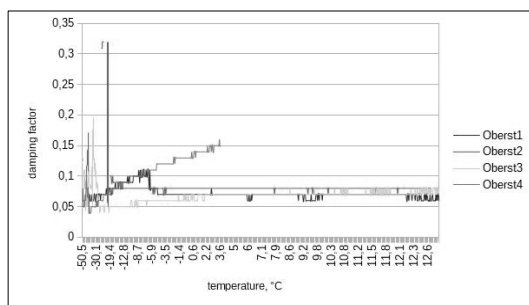
15. ábra, Egyszerű próbatest első négy sajátfrekvenciája a hőmérséklet függvényében



16. ábra, Egyszerű próbatest első négy sajátfrekvenciájának Oberst-féle csillapítási tényezője a hőmérséklet függvényében



17. ábra, Jones próbatest első négy sajátfrekvenciája a hőmérséklet függvényében



18. ábra, Jones próbatest első négy sajátfrekvenciájának Oberst-féle csillapítási tényezője a hőmérséklet függvényében

Tervezzük a kutatás kibővítését ugyanilyen gumiheveder MTS szakítógépen történő statikus és dinamikus nyírási modulusának hőmérsékletfüggő vizsgálatával, továbbá mindezen vizsgálatok más anyagú próbatestekkel történő elvégzésével is.

Az MTS szakítógép rendelkezik klímakabin opcióval, amely folyékony nitrogénnel hűthető a kívánt hőmérsékletre. Azonban ez a berendezés hidrodinamikus elven működik, így dinamikus vizsgálatokhoz a frekvenciatartománya jelentősen kisebb (kb. 10-20 Hz-ig, több tényezőtől függően), mint a B&K elektrodinamikus shaker-é (4 kHz) és mint amit az utóbbival meghatározott sajátfrekvencia értékek megkívánálnának. Emiatt ennél a feladatnál a B&K shaker kiváltására sem ezen okból, sem a számottevően magasabb üzemeltetési költségei szempontjából nem alkalmas, csak néhány kiegészítő szakítóvizsgálat elvégzésére, amely a kutatás egy másik irányát nyithatja meg a későbbiekben.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elvégzett vizsgálatok azt mutatják, hogy a szállítószalag heveder anyagjellemzői jelentősen függenek a hőmérséklettől. Minusz 40 és plusz 20 °C fok között vizsgálva jelentősen változik a rezgésillapító képessége és a sajátfrekvenciája is. A konkrét egyszerű próbatestnél például a hőmérséklet növekedésével az első

sajátfrekvenciája lecsökken 187 Hz-ről 38 Hz-re. A sajátfrekvencia és a rezgésillapítási tényező ilyen változása meghatározó szempont lehet a gyakorlati alkalmazás vonatkozásában. A rezgésillapító anyagok hőmérsékletfüggő viselkedésének alaposabb megismerésére további lehetőségeket biztosíthatnak még a klimatizált statikus és dinamikus húzóvizsgálatok is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutatómunka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatásával a K 134358 nyilvántartási számú projekt keretében valósul meg.

Irodalom

- [1] Farkas,J.,Jármai,K.: Analysis and optimum design of metal structures, Balkema Publishers, Rotterdam, Brookfield, 1997, 347 p. ISBN 9789054106692/90 5410 669 7.
- [2] Dömötör F.: Rezgésdiagnosztika I. kötet, Dunaújvárosi Főiskolai Kiadó, 2008
- [3] www.ni.com címen elérhető információs források a NI adatgyűjtő rendszer programozásához
- [4] www.octave.org , www.matlab.com címeken elérhető és más internetes információs források az Octave (Matlab) mérésértékelő program elkészítéséhez
- [5] www.gummilabor.it, Energum EP/630/4 datasheet

BERENDEZÉS A MŰANYAG KIS KERESÉSEK HIBA ELEMZÉSÉRE

EQUIPMENT FOR THE ANALYSIS OF FAULTS OF SMALL PLASTIC GEARS

Imre Marada, Dr. János Bihari***

ABSTRACT

In the case of small plastic gears, production volumes and manufacturing processes severely limit the number of methods that can be used to detect faults. It is therefore particularly important to understand the phenomena caused by faults that are also present, detectable, and measurable on the gear shafts. Among the rotational characteristics, the measurement of the torque on the input side is a common test method for gear drives, especially for bevel gears. This method is also suitable for detecting certain faults in gearboxes with small gears and for distinguishing the effects of faults and manufacturing characteristics. In this research, we have established the basis and equipment for a series of measurements that can be used to gather more definitive information than previously known, to understand the effects of faults in small plastic gears.

1. INTRODUCTION

Among the rotational characteristics, the measurement of the torque on the input side is a common test method for gear drives, especially for bevel gears. It has been shown previously that this method can also be used to detect certain faults in gearboxes containing small gears, ($m \leq 0.5$ mm with a maximum characteristic size not larger than 30 mm) and to distinguish the effects of faults and manufacturing characteristics.

However, the tools available for us in the past were limited. We could not achieve gear ratios different than 1:1. In addition, we could not create multi-stage drives. There were also problems with the accurate positioning of the equipment. We presented these problems in [1]. We had also limited possibilities with the measured faults, as we could not produce gears with these specific faults. For these reasons, we had to design new equipment and find a way to create small plastic gears with faults.

In this research, this method will be refined to define the ideal design of drive units and to design and integrate gears with specific faults in drive units, taking advantage of the potential of new technologies, for example SLA 3D printing. In this way, the measurement results associated with each fault can be more accurately determined.

2. THE DRIVE UNITS

For testing plastic gears, suitable test benches are used. [2] [3] However, such a bench would be expensive to build for testing small plastic gears. Therefore, we had to develop alternative equipment that would allow testing of the complete system, while keeping the gears in the correct position and ensuring they can be loaded throughout the entire duration of the measurements. For this purpose, we have designed a special drive unit which, when installed in the appropriate equipment, can be used to carry out the measurements with the given settings. This replaces expensive test benches with a more affordable alternative. The drive units are designed so that a static torque meter can be used for the tests. Therefore, we preferred designs where the rotatability of the complete drive unit is possible.

2.1. The requirements

We have taken several aspects into account when designing the drive units. These include [1]:

1. They should hold a pair of gears.
2. They can be used to develop multiple gear ratios.
3. They should be capable of being combined, i.e., multi-stage drives should be possible.
4. They can always be positioned in the same way within the specified accuracy into the clamp.
5. There must be sufficient space for the gears.
6. Have high stiffness in the bearings.
7. They should have two divisions perpendicular to the gear axes, (e.g., a central housing part with two covers for the bearings).
8. To produce as many versions as possible, using the resources and technologies available for us.

2.2. The design and manufacture of the drive units

Two versions of drive units were designed. Each of these drive units are made up of three parts. The central part is a central housing, which remains constant for all tests. A pair of covers are connected to the housing part. These covers contain the bearings. The covers are

* PhD Student, University of Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, 3515, Miskolc, Hungary

** Associate Professor, University of Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, 3515, Miskolc, Hungary

interchangeable, so that parts with different designs and wheelbases can be fitted to the housing, depending on the gear ratio, or bearing arrangement to be tested. In addition, the drive units are accurately positioned by means of positioning holes and pins, so that they can always be fitted in the same way in the housing with the required precision. In addition, it is possible to combine the drive units, so that multi-stage drives can be designed. For the multi-stage design, we have also created intermediate pieces, which are located between the drive units and serve to accommodate the couplings.

2.2.1. The first type

The first type has a classic, rectangular body design. However, it has a major disadvantage; that it can only be produced with sufficient precision using accurate CNC milling machines, which are not currently available for us.

The prototype of these drive units is produced with an Ultimaker FDM 3D printer. This prototype will not be used for tests, as it is not accurate enough.

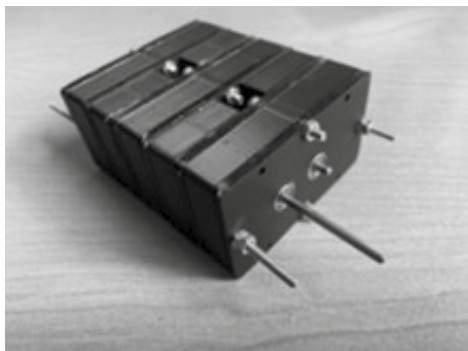


Figure 2. The prototype of the drive unit

2.2.2. The second type

This type of drive unit has a cylindrical design. This is necessary to make it as easy as possible to machine them with a lathe. This is also advantageous because it is easier to calibrate for testing. Another big advantage is that the cover is designed so that the tested shaft is coaxial with the drive unit. This makes it easier to coaxially align the drive unit with the motor and the torque measuring shaft.

Prototypes of these drive units were also made. The prototype was made by machining polycarbonate. It can be used for measurements, however in the future, these drive units will be made of a luminum or steel.

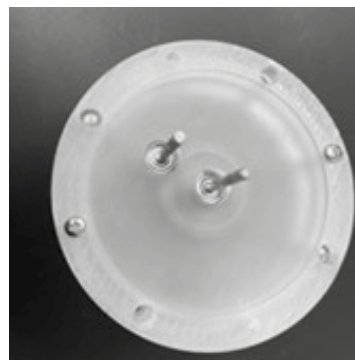


Figure 3. The prototype of the drive unit

3. THE MANUFACTURE OF GEARS FOR THE MEASUREMENTS

The gears used for the measurements are produced with a Phrozen Sonic Mini 4k SLA 3D printer. The software KISSsoft was used to generate the geometry for the production. The advantage of this software compared to other similar software is that it generates an involute profile.

The tooth profile was created according to DIN 3967 and VDI 2731. [4][5]

The material of the gears is a resin called "Rock-Black Stiff", produced by Phrozen.

The gears are created with different modules and numbers of teeth, in order to make measurements for as many different cases as possible. All gears are produced without faults and also with the faults. This is necessary to compare the running characteristics of gears with and without faults during the measurements. These faults are the faults that are typical of injection molded gears. [6][7] The faults include non-involute profile, waviness of the tooth, material gaps on the tooth flank, and an increase or decrease in the size of the teeth compared to the standard dimensions. The faults were created by modifying the tooth profile in the CAD software.

This manufacturing method is a huge improvement over those available in the past, as we previously were unable to produce gears with such faults in prior tests.

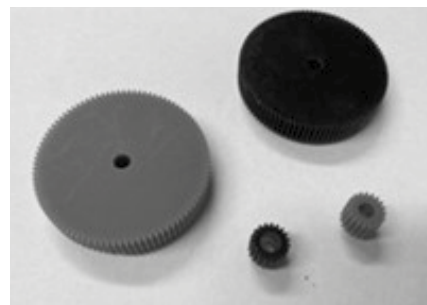


Figure 4. The manufactured gears

4. THE PRINCIPLE OF MEASUREMENT

The entire drive unit is rotated when the torque is measured. One shaft of the drive unit is connected to the torque meter, which is stationary during the process. This is advantageous because it allows the use of a static torque measuring shaft. It requires less effort and less preparation for the accuracy required for this measurement, than non-static torque meters.

For the measurement, first we must determine the optimal number of steps for the drive units, which will give the clearest measurement results. Next, we will assemble drive units that contain gears with faults and, for comparison, gears without faults. Tests shall be carried out to determine the torques that will be applied on the drive units. Finally, the running characteristics of drive units containing gears with faults must be compared with those of drive units without faults.

5. THE EQUIPMENT FOR THE MEASUREMENT

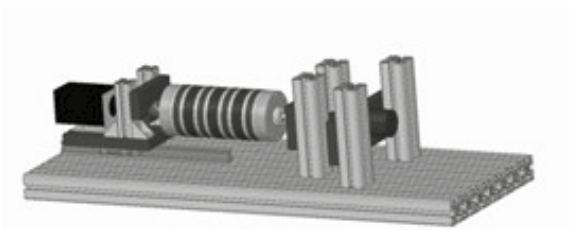


Figure 5. The 3D model of the equipment with the cylindrical drive unit

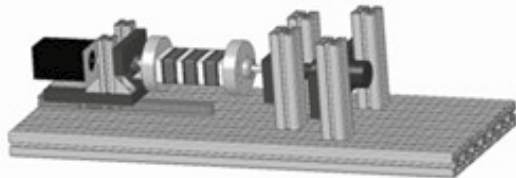


Figure 6. The 3D model of the equipment with the rectangular drive unit

The rotation is performed by an electric motor. On each side of the drive unit, we have fitted custom-designed connecting elements. These are connected to the shafts by KL locking devices, which's shafts are supported by bearings. The double bearing arrangement ensures that the drive unit does not stress the bearings during measurement, thus guaranteeing the required accuracy. One of these shafts is connected to the motor, the other shaft is hollow. This is necessary to connect the measured shaft of the drive unit to the torque meter.

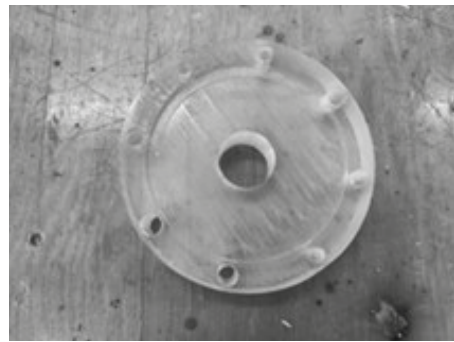


Figure 7. The connecting element

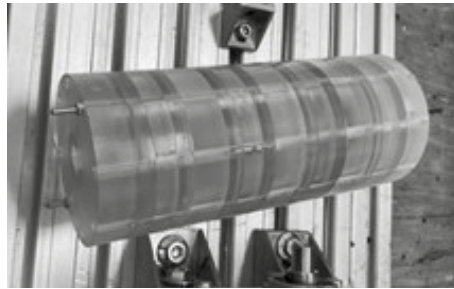


Figure 8. The connecting elements combined with a four-stage drive unit

To simplify installation and to ensure measurement with different steps, a linear guide is used. This means that the block of the linear guide is attached to the motor and the motor-side bearing assembly so that they can be moved to the correct position.

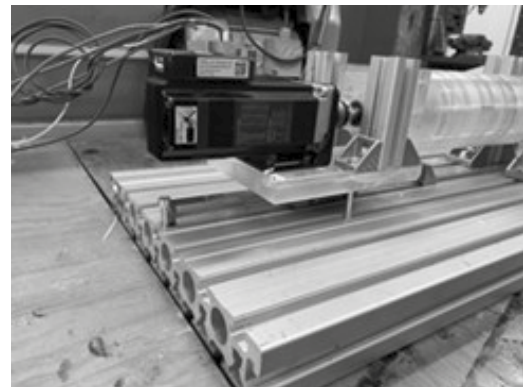


Figure 9. The linear guide and the motor

For the measurement of torque, we use a PCE TM-80 torque measuring shaft. It has a resolution of 0,1 Ncm with a measurement range from 0 to 147 Ncm.



Figure 10. The torque measuring shaft

With the installation of the cylindrical drive unit, we made a prototype for the measuring equipment.

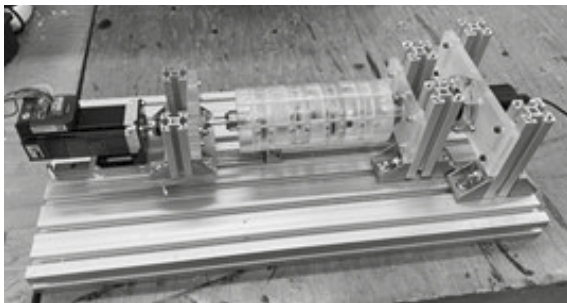


Figure 11. Prototype of the equipment

6. SUMMARY

In this research, we have established the basis and equipment for a series of measurements that can be used to gather more definitive information than previously known to analyze the faults in small plastic gears. We designed the special drive units and the equipment for the tests. We also generated and created small plastic gears with the help of 3D printers. A prototype of this equipment was manufactured. Our next step will be the further improvement of the equipment and the measurement of the torque. We will carry out many measurements for different faults, modules, and gear ratios.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

„SUPPORTED BY THE ÚNKP-22-3 NEW NATIONAL EXCELLENCE PROGRAM OF THE MINISTRY FOR CULTURE AND INNOVATION FROM THE SOURCE OF THE NATIONAL RESEARCH, DEVELOPMENT AND INNOVATION FUND.”

The authors would like to thank Attila Potyka, István Pásztor and Dr. Ferenc Sarka for their help in the production of the prototype of the drive units.

8. REFERENCES

- [1] MARADA I., BIHARI J.: *Designing a new type of drive unit for the analysis of small plastic gears*, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye 11: 5 pp. 245-250., 6 p., 2021, doi: <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.5.25>
- [2] VDI 2736 Thermoplastische Zahnräder, BeuthVerlag, Berlin, 2014.
- [3] JIS B 1759:2019 (JGMA/JSA) Estimation of tooth bending strength of cylindrical plastic gears, Japanese Standards Association, Tokyo, 2020.
- [4] DIN 3967 Getriebe-Paßsystem; Flankenspiel, Zahndickenabmaße, Zahndickentoleranzen, Grundlagen, Deutsche Institut für Normung, Berlin, 1978.
- [5] VDI 2731 Mikrogetriebe, Grundlagen. BeuthVerlag, Berlin, 2009.
- [6] Kies, T.: Herstellung von Zahnräder in Spritzgussverfahren – Möglichkeiten und Grenzen. Martin-Luther Universität Halle, 2016.
- [7] Zahnräder aus thermoplastischen Kunststoffen. VDI Verlag, Düsseldorf, 1981.

FLD GURSON FÉMMEL EGYSZERŰ LAPOS MINTÁHOZ

FLD WITH GURSON METAL FOR SIMPLE FLAT SPECIMEN

Domokos Tatiane*, Baksa Atilla**, Szávai Szabolcs***

ABSTRACT

In the past, the prediction of ductile damage and fracture of metal materials under complex loadings has been an important topic in industries like the metal forming industry. The GTN model is one of the most classical damage models regarding damage mechanics, which has a wide application and perfect evolution in studies of fracture of ductile metal. GTN originated from Gurson and later enhanced by Tvergaard and Needleman. The improvement consists of inserting an equivalent void volume fraction f and two more parameters called q_1 and q_2 into the yield function of Gurson's model, to model the complete loss of load-carrying capacity at a realistic void volume fraction.

Keywords: Forming limit diagram (FLD); Gurson model; Abaqus

1. INTRODUCTION

This paper presents a short explanation about the Forming Limit Diagram (FLD) and the GTN model. It gives the result of simulations of a simple flat specimen by means of the Abaqus simulation software. The test result is for a flat specimen based on the deformation and fracture of tensile test. The material simulated here is Aluminum alloy 6061. The goal of this work is to start a study where a forming limit diagram and the desired material characterization will be determined, intended for the metal forming industry. Finally, the GTN parameters can be determined based on some experiments on a simple specimen.

2. FORMING LIMIT DIAGRAM (FLD)

A forming limit diagram is a graph which describes the major strains (ϵ_1) for all the values of the minor strain (ϵ_2) at the beginning of localized necking. Normally, it is difficult to determine a FLD due to the special equipment required, and the time needed. [3]

* Institute of Applied Mechanics, University of Miskolc

** Institute of Applied Mechanics, University of Miskolc

*** Institute of Machine and Product Design, University of Miskolc

3. GTN MODEL

Gurson-Tvergaard-Needleman model says that local damage is due to nucleation, growth, and subsequent coalescence of voids inside the material. These mechanisms are responsible for a resistance loss which in turn, gradually leads to the failure. The equation 1 indicates the model. [1]

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

where $f^*(f)$ is the damage function of the micro-void volume fraction or porosity (f).

Tvergaard considered the constants as $q_1 = 1.5$, $q_2 = 1$ and $q_3 = q_1^2$ for the void volume fraction and pressure terms. q is the effective stress of the macroscopic Cauchy stress tensor and σ_y describes the hardening of a fully dense matrix material. The damage model considers three main phases of damage evolution including nucleation (N), growth (G) and coalescence (C) [1]:

$$df = df_N + df_G + df_C \quad (2)$$

The nucleation of micro-voids is expressed by [1]:

$$df_N = \left(\frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}}\right) \exp\left\{-\frac{(\bar{\epsilon}^p - \epsilon_N)^2}{2S_N^2}\right\} d\bar{\epsilon}^p \quad (3)$$

The normal distribution of the nucleation strain has a standard deviation of S_N , a mean value of ϵ_N and nucleate voids with a volume fraction of f_N . Growth of the present voids is based on the apparent volume change and the law of conservation of mass, and is expressed as [1]:

$$df_G = (1-f) \cdot (d\epsilon_{11}^p + d\epsilon_{22}^p + d\epsilon_{33}^p) \quad (4)$$

Finally, regarding the coalescence and final material failure, the modification of the yield condition is introduced through the function $f^*(f)$ specified by Tvergaard [1]:

$$\begin{cases} f^* = f & f < f_c \\ f^* = f_c + \delta(f - f_c) & f \geq f_c \end{cases}$$

With:

$$\delta = \frac{(f_u^* - f_c)}{(f_f - f_c)} \quad f_u^* = \frac{1}{q_1}$$

Table 1 The initial values of GTN parameters according to the literature. [3]

References	q_1	q_2	ϵ_N	S_N	f_b	f_1	f_n	f_c	Material	Comment
Bauvineau et al. (1996)	1.5	1	-	-	0.002	-	-	0.004	CMn steel	
Decamp et al. (1997)	1.5	1	-	-	0.0023	0.225	-	0.004	CMn steel	Uniaxial tensile test at 300°C on axisymmetric notched specimens
Siegmund et al. (1998)	1.5	1	0.3	0.1	0.0025	-	0.02	0.021	E460 steel	
Schmidt et al. (1997)	1.5	1	0.3	0.1	0	0.212	0.002	0.06	Ferritic steel base	Uniaxial tensile test at ambient temperature
	1.5	1	0.3	0.1	0	0.197	0.002	0.04	HAZ Ferritic	
	1.5	1	0.3	0.1	0	0.189	0.012	0.03	Austenitic steel cladding CMn steel	
Skallerad and Zhang (1997)	1.25	1	0.3	0.1	0.0003	0.15	0.006	0.026	CMn steel	Tensile test
Benseddiq and Imad (2008)	1.5	1	0.3	0.1	~0	~0.2	0.002-0.02	0.004-0.06		

4. MATERIAL AND METHODS

4.1. Material

Aluminum alloy 6061 was selected as the sample test. Table 2 lists the mechanical properties of the studied Aluminum alloy.

Table 2 Mechanical properties and thickness of Al6061 properties (heat treated).

Yield Stress (MPa)	~240
Tensile strength (MPa)	~260
Elongation (%)	~9-10
Hardness	85 HB
thermal expansion	23x10e-6 1/K
modulus of elasticity	~70 GPa
poisson ratio	0.35
density	2700 kg/m ³
thermal conductivity	~180W/mK

4.2. What is 6061 Aluminum?

6061 aluminum, also known as Alloy 61S, is a precipitation-hardened aluminum alloy, containing magnesium and silicon as its major alloying elements. Aluminum 6061 is one of the most commonly extruded alloys. It also has good weldability. 6061 aluminum is available in pre-tempered grades, including 6061-O, 6061-T, and 6061-F. The economical price, lightweight, high strength and versatility make alloy 6061 a popular material in CNC machining services to make precision aluminum machined parts for a host of industries.

4.2.1 6061 Aluminum Applications

Aircraft wings and fuselages, boats, automotive parts, flashlights, cans, fishing reels, firearms, forgings, bicycle frames and parts, etc.

Here is a comparison between A380 and 6061 aluminum in multiple aspects, including composition, physical properties, mechanical properties, and more. [4]

Table 3 Chemical composition of Al6061 properties

	6061 Aluminum
Aluminum (%)	95.9 - 98.6
Chromium (%)	0.04 - 0.35
Copper (%)	0.15 - 0.4
Iron (%)	0 - 0.7
Magnesium (%)	0.8 - 1.2
Manganese (%)	0 - 0.15
Nickel (%)	0
Silicon (%)	0.4 - 0.8
Tin (%)	0
Titanium (%)	0 - 0.15
Zinc (%)	0 - 0.25
Residuals (%)	0 - 0.15

Table 4 Physical and Thermal Properties of Al6061

	6061 Aluminum
Density (g/cm ³)	2.7
Melting Completion (°C)	650
Melting Onset (°C)	580
Thermal Conductivity (W/m-K)	170
Thermal Expansion (µm/m-K)	24

Table 5 Mechanical Properties of Al6061

	6061 Aluminum
Elongation at Break, %	3.4 - 20
Fatigue Strength, MPa	58 - 110
Shear Modulus, GPa	26
Shear Strength, MPa	84 - 210
Ultimate Tensile Strength, MPa	130 - 410
Tensile Tensile Strength, MPa	76 - 370

Example: AA6061, used in car steering knuckles for instance, has an average tensile strength of 383 MPa and elongation 10.7%. The alloy was optimized by adding minor quantities of zirconium, zinc and copper. [5]

Table 6 Mechanical Properties of Al6061 with relation to temperature.

Temperature	Elastic Modulus	Poisson's Ratio	Thermal Expansion	Thermal Conductivity	Specific Heat
K	GPa		$10^{-6}/K$	W/m K	J/kg K
10	76.5951	0.3239	0.2525	14.3824	1.5609
20	76.5621	0.3240	0.5045	28.4645	8.8829
30	76.4967	0.3242	0.9477	41.0270	33.4402
40	76.4011	0.3243	1.7028	52.2049	81.9529
50	76.2777	0.3245	2.8316	62.1332	149.1508
60	76.1285	0.3248	4.3375	70.9469	223.9242
70	75.9555	0.3250	6.1652	78.7811	297.9033
80	75.7608	0.3253	8.2007	85.7707	368.3660
90	75.5463	0.3255	10.2179	92.0509	433.5356
100	75.3137	0.3258	11.8261	97.7565	492.5810
110	75.0647	0.3262	13.1962	103.0226	545.6162
120	74.8011	0.3265	14.3611	107.9842	593.7009
130	74.5243	0.3268	15.3513	112.7788	637.9319
140	74.2358	0.3271	16.1946	116.8674	677.6165

4.3. Tensile test simulation results

Assuming the Tvergaard coefficients being fixed, the model parameters were adjusted by applying an uniaxial tensile test.

In particular, the load vs. displacement curve during a tensile test on a sheet specimen must be employed to optimize the comparison between the numerical results and the experimental ones, and consequently to achieve the desired material characterization.

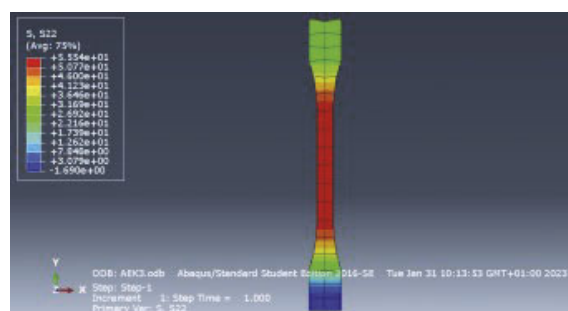


Fig.1 Elastic deformation

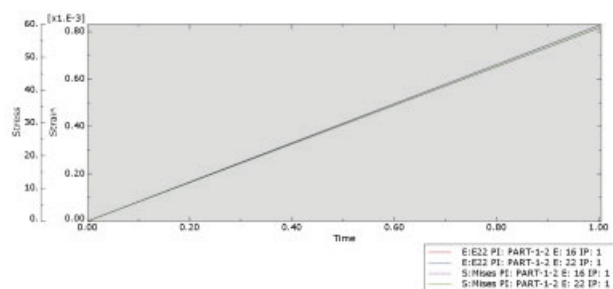


Fig.2 Stress x Time

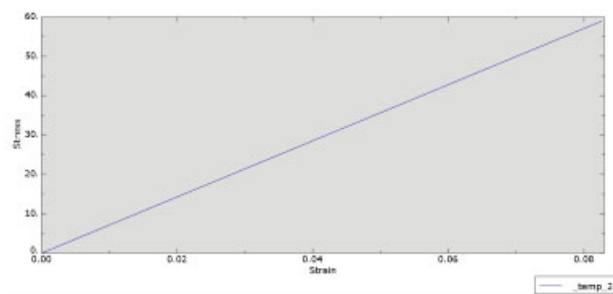


Fig.3 Stress x Strain

4.4. Perspectives

The main goal is to determine the GTN parameters for an Aluminum alloy with industrial applications.

Assuming the Tvergaard coefficients being fixed, the model parameters were adjusted by applying an uniaxial tensile test.

In particular, the load vs. displacement curve during a tensile test on a sheet specimen has been employed to optimize the comparison between the numerical results and the experimental ones, and consequently to achieve the desired material characterization. [2]

The value of ϵ has been fixed equal to 0.0002 [2] From [7] Modeling and simulation. Temperature dependent material properties for Aluminum 6061.

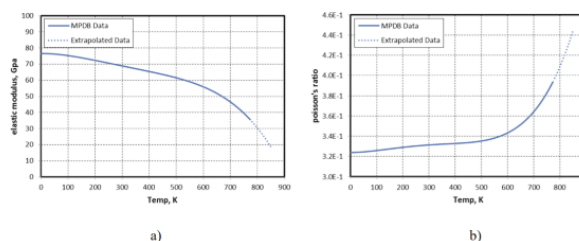


Fig.4 a) Elastic Modulus; b) Poisson's Ratio

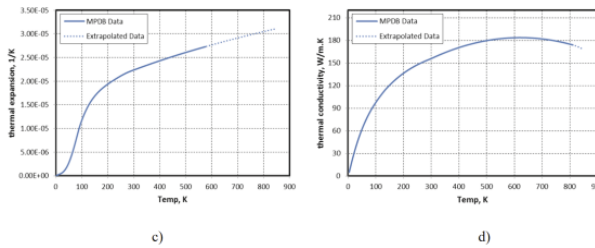


Fig.5 ; c) Thermal Expansion; d) Thermal Conductivity

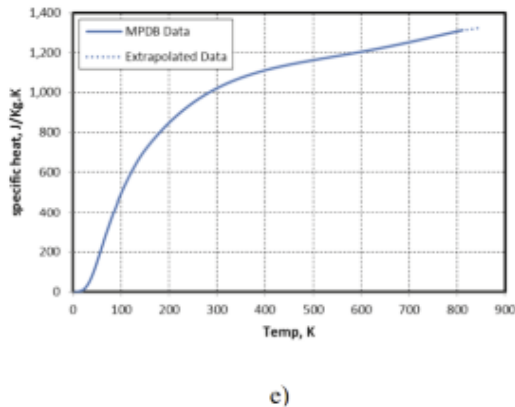


Fig.6 e) Specific Heat.

Figure 4, 5 and 6: Properties include a) Elastic Modulus; b) Poisson's Ratio; c) Thermal Expansion; d) Thermal Conductivity; and e) Specific Heat.

Table 7: material properties for Aluminum 6061 at room temperature.

Density, kg/m^3	2700
Elastic Modulus, GPa	68.9
Poisson's ratio	0.33
Thermal conductivity, W/mK	220
Specific heat, J/kgK	904
Thermal Expansion coefficient, 10^{-6}K^{-1}	23.6

Table of Temperature Dependent Material Properties for Aluminum 6061
Data is taken from MPDB material database software [6]

6. REFERENCES

- [1] M. Abbasi, "Identification of GTN model parameters by application of response surface methodology," ScienceDirect, Procedia Engineering10 pp. 415–420, 2011, doi:10.1016/j.proeng.2011.04.070
- [2] L. Fratini, "Material Characterization for the Prediction of Ductile Fracture Occurrence: An inverse approach," in Journal of Materials

Processing Technology, Volume 60, Issues 1–4, 15 June 1996 ed. Palermo, Italy: 1996, pp. 311–316. doi:10.1016/0924-0136(96)02347-3

- [3] C. Yassine, "Detemination of GTN Parameters of Sent Specimen During Ductile Fracture," MultiScience – XXXIII. MicroCAD International Multidisciplinary Scientific Conf., Miskolc, Hungary, 2019, ISBN 978-963-358-177-3.
- [4] DCM Diecasting-Modul - A380 Aluminum vs 6061, What's the Difference - What is A380 Aluminum | Diecasting-mould
- [5] Aluminium Alloys in the Automotive Industry: Handy Guide – Aluminium Insider [Online]. Available:aluminiuminsider.com/aluminium-alloys-automotive-industry-hand-guide
- [6] I. JAHM Software Inc. (1998) Mpdb material database software. [Online]. Available: https://www.jahm.com/pages/about_mpdb.html
- [7] Tuning Johnson-Cook Material Model Parameters for Impact of High Velocity, Micron Scale Aluminum Particles | Semantic Scholar

TEHERGÉPKOCSI TARTÁLYÁNAK TŰZVÉDELMI TERVEZÉSE KÖZÚTI BALESET ESETÉN

FIRE SAFETY DESIGN OF TRUCK TANK IN PUBLIC ROAD ACCIDENT

Petrik Máté*, Bolló Betti** Jármái Károly***

ABSTRACT

The focus of the research is to determine the fire-resistant time of a truck tank containing different liquids in case of a public road accident. The wall material and the wall thickness of the tank have a significant effect on the fire resistance. Depending on the heat release rate, the process can be rapid. We make the calculations for the given tank dimensions and try to optimise the tank for the necessary fire resistance time R30 and R45.

The vessel on a track cannot be classified as a classic pressure vessel, even though the fluid in the cylindrical shell is already loading hydrostatic pressure on the vessel wall. This is due to the dynamic and fatigue loads resulting from the vehicle's progress. Typically, two problems can occur in the event of a fire in such a tank. When transporting a flammable liquid, the fire can cause the pressure in the vessel to increase, resulting in the vessel rupturing. The use of safety equipment can avoid this. However, a BLEVE phenomenon may occur if the tank is left on fire for too long. On the other hand, when transporting solid granular materials, the medium is less able to dissipate heat, so the container may weaken under the weight load, which may also result in cracking. If the granular material is combustible, a more severe fire may develop.

KIVONAT

A kutatás középpontjában a különböző folyadékokat tartalmazó tehergépkocsik tartályának tűzállósági idejének meghatározása áll egy közúti baleset esetén. A tartályfalának anyaga és falvastagsága jelentős hatással van a tűzállóságra. A hőfelszabadulási sebességtől függően a folyamat nagyon gyors lehet. Az adott tartályméretekre elvégezzük a számításokat, és megpróbáljuk optimalizálni a tartályt a szükséges R30, illetve R45 tűzállósági időre.

A vizsgálat tárgyát képező tartályok nem sorolhatók a klasszikus nyomástartó edények közé, annak ellenére, hogy a hengeres héjban lévő nyomás alatti folyadék nyomást gyakorol a tartályfalára. A különbözőség oka a jármű haladásából eredő dinamikus és fárasztó terhelések. Egy ilyen tartályban keletkező tűz esetén

jellemzően két probléma merülhet fel. Gyúlékony folyadék szállítása esetén a tűz hatására a tartályban megnőhet a nyomás, ami a tartály felhasadásához vezethet. Ez biztonsági berendezéssel elkerülhető, de BLEVE jelenség léphet fel, ha a tartály túl sokáig a tűz hatás alatt marad. Szilárd szemcsés anyagok szállítása esetén a közeg kevésbé képes a hő elvezetésére, így a tartály meggyengülhet a súlyterhelés alatt, ami szintén meghibásodáshoz vezethet. Ha a szemcsés anyag éghető, még súlyosabb tűz alakulhat ki.

1. BEVEZETÉS

Modernkori világunkban a termékek a fogyasztóhoz történő szállítása szárazföldön jellemzően közúti és vasúti módon történik. Nincs ez másképp a vegyipar termékeivel kapcsolatban sem. Természetesen vannak közegek, amelyek a mindennapi életünkhöz nélkülözhetetlenek, például ivóvíz, távfűtés, melyek elérhetőségét folyamatosan biztosítani szükséges. Ezeket kiépített csőhálózaton keresztül szükséges szállítani. A többi közeget, legyen az szilárd szemcsés, folyadék vagy gáz halmazállapotú, diszkrét adagokban, néhány köbméteres egységekben szállítják a felhasználás helyszínére. Lehetnek ezek az anyagok élelmiszeripari eredetűek (például tej, szemestakarmány, liszt), vegyipari jellegűek (például kőolajszármazékok, oldószerek), faipar, cementipar stb. [1]. Jelen tanulmány a közúti tartálykocsik balesetét feltételezi, ahol a tartályba oldalirányban egy személyautó beleütközik, és annak üzemanyaga kigyullad. Ilyen balesetre mutat példát az 1. ábra.



1. ábra Tartálykocsi és személyautó ütközése [1]

* adjunktus, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

*** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

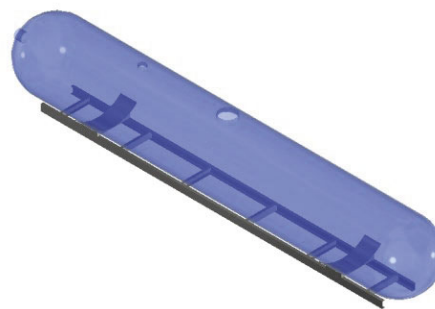
Az előzőekben bemutatott példák közül gyakorlatilag csak a tejhez nem szükséges társítanunk extra kockázatot, mert egyrészt alacsony nyomás a latt történik a szállítása, másrészt a tartály felhasadása esetén sem az égést nem fogja táplálni (szerencsés esetben meg is szüntetheti), sem környezeti károkat nem fog okozni. Ezek a jellemzők nem mondhatók el a többi példáról. A mezőgazdasági takarmányok táplálhatják a tüzet, ezek őrleményei, a cementpor, fűrészpor porrobbanásra képes. Az oldószerek, kőolajszármazékok jellemzően kis szaturációs nyomással jellemezhetők, tehát viszonylag könnyen elgőzölögnek, továbbá tűz- és robbanásveszélyesek, így a szabadba kerülésükkor potenciálisan veszélyes atmoszféra jön létre [3-5].

1.1. Közúti tartálykocsi

A közúti tartálykocsik gyakorlatilag a legegyszerűbb konstrukciójú nyomástartó edények közé tartoznak: egy hengeres köpeny két domborított edényfenékkal lezárva. Ezt az edényt egy alvázszerkezetre fektetik fel, az alátámasztást jellemzően két nyereggel oldják meg. Az edény a lapterhelése a belső nyomás, mely gázok/gőzök és nyomás alatt lévő folyadékok esetén a gőztér nyomásával egyezik meg, szilárd szemcsés anyagok, porok és atmoszféricusan szállított folyadékok esetén a hidrosztatikai nyomással azonosítható. A héjelemekben ébredő feszültségek a klasszikus nyomástartó edényekkel foglalkozó elméletekkel határozható meg. Ezek ellenére mégsem tartozik a nyomástartó edények közé, melynek oka a forgalomból és útviszonyokból származó dinamikus és ismételt hatások jelenléte. Éppen ezért külön rendelet foglalkozik az ilyen berendezésekkel, kifejezetten a veszélyes közegek szállítására, melyet a Veszélyes Áruk Nemzetközi Közúti Szállításáról Szóló Európai Megállapodás (röviden ADR) tartalmaz [6,7].

1.2. Alvázszerkezet

Az alváz funkcióját tekintve kettős: ezen a szerkezeti elemén keresztül történik a tartály felfogatása és rögzítése, valamint ehhez csatlakoztatják a lengéscsillapítón keresztül a futóművet, valamint a fékberendezést. Az alvázak többnyire létra alakúak, jelen esetben viszont többszörösen indokolt ennek az alakzatnak az alkalmazása, annak érdekében, hogy a jármű haladásából származó terhelések a lehető legkisebb mértékben adódjanak át az edénynek [8,9]. Ennek értelmében a teherbíró képességen túl nagy csavarási és hajlítási szilárdság követelményeket társítható az alváz mellé. A létra alakú alvázakat éppen ezért úgy készítik el, hogy a tartók különböző I, C vagy U profilból kerülnek kialakítása, melyeket keresztartókkal hegesztenek, szegecselnek vagy csavaroznak össze. Egy ilyen lehetséges létra alakú alvázat mutat a 2. ábra.



2. ábra Alvázszerkezet a tartályal

1.3. Tűzterhelés

Jelen tanulmány célja, hogy egy baleset következtében kialakult tűzhatás milyen hatásokat okoz az edény falában, valamint az edény belsejében. A tűz vizsgálatakor mindhárom hőterjedési módot figyelembe kell venni. Maga a tűz sugárzással és konvekcióval melegíti az edény falát, melyben vezetéssel fog a hő továbbterjedni. Azonban ennek következtében a bezárt közeg is felmelegszik, vagyis elszállítja a hőt a tartály falától, tehát hűti a berendezésünk falát, így növelheti a tűzbenállóság idejét. Azonban a helyzetet tovább nehezítheti a bezárt közeg minősége. Az átadott hő nagyságát, a hőcserélőknél megismert módon, a teljes folyamat jellemzi, és a hatékonysága, vagyis a folyamatot jellemző hőátbocsátási tényező reciprokl törvény szerint függ a résztényezőktől.

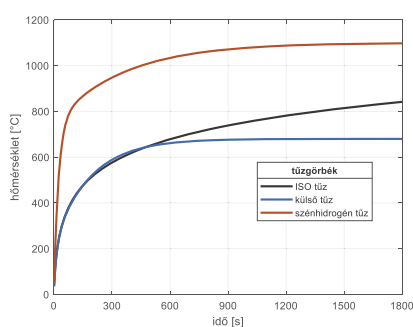
Szilárd szemcsés anyagok és porok esetén a belső oldalon is hővezetést kell feltételeznünk. Ahogy a bevezetőben tárgyalásra került, ezek jellemzően valamilyen mezőgazdasági eredetű, szerves anyagok porai, amik önmagukban is kis értékű hővezetési tényezővel jellemezhetők, amit tovább ront a porozitásuk. Ezek miatt a tűzhatás sokkal koncentráltabb lesz, vagyis a tűzhatás helyén nagyobb acélhőmérsékletek alakulnak ki, ami a tartály felhasadását okozhatja. Hermetikusan bezárt edényeknél a levegő melegezéséből megnövekedhet a nyomás, de nem ez lesz a veszélyes terhelés, hanem az előzőleg tárgyalt koncentrált hőterhelés.

Folyadékok esetén a belső oldalon kialakuló hőátadási tényező értéke elérheti, akár meg is haladhatja a külső oldalon keletkező értéket, hiába zárt a rendszer, és csupán természetes cirkuláció alakul ki. Ennek következtében a folyadék hőmérséklete közel konstansnak tekinthető, jelentős mértékben hűti a falat, így elősegítve a tűzállóságot. A nyomásterhelés időbeli lefolyása szempontjából két közegtípust kell megkülönböztetni. Amennyiben a folyadék kis szaturációs nyomással jellemezhető (a víznél kisebb), nem szükséges feltételezni, hogy jelentős mennyiségű részecske lép át a gőztérbe, így a nyomásterhelés nagysága nem fog jelentősen növekedni. Vízről illékonyabb közegek esetén, jellemzően szénhidrogének vagy más szerves

anyagok esetén azonban a fázisváltozás végbe fog menni, így jelentős mértékben növekszik a belső nyomás értéke, ami növeli az edény felhasadásának kockázatát. További problémát okoz a BLEVE jelensége, amit részletesen a következő részben mutatunk be [10].

Gázok és gőzök esetén szintén kialakul egy belső cirkuláció, de a hőátadást befolyásoló anyagjellemzők közötti nagyságrendi eltérés miatt az itt tapasztalható hőátadási tényező jellemzően kisebb érték lesz, vagyis az átadott hő nagysága is kisebb lesz. A hőmérséklet-növekedés sebességével lesz arányos a nyomásnövekedés sebessége, mivel az általános gáztörvény segítségével határozható meg adott időpillanatban a nyomás pillanatnyi értéke.

Mivel a tűzterhelések időben változó folyamatok, így a számítások során tranziens folyamatként szükséges őket figyelembe venni. A 3. ábra a különböző tüzek hőmérséklet-idő dia gramjai láthatók [15].



3. ábra Tűzmodellek összehasonlítása

Az ábrán látszik, hogy szénhidrogének esetén a kezdeti állapotban egy nagyon gyorsan növekvő hőmérséklet feltételezhető, ami görbe később eléri egy maximumot 1098°C értéknél. A külső tüzeknél sokkal kisebb hőmérsékletnövekedési sebesség tapasztalható, és a maximum értéket is mindössze 680°C-nál éri el. A szabványtűz az előzővel megegyező hőmérsékletnövekedési sebességet predesztinál, ez a görbe viszont monoton növekszik.

1.4. BLEVE jelensége

A BLEVE rövidítés az angol Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, vagyis forráspontú folyadék gőzzé történő expanziója által bekövetkezett robbanásért jött létre. Jellemzően éghető közegek esetén szükséges figyelembe venni, mint potenciális veszélyforrást, de nem éghető közegek, például víz esetén is értelmezhető. Az expanziót, vagyis térfogatnövekedést a nagy hőmérsékletű folyadék-gőz fázisba történő átmenete fogja okozni. Zárt tartály esetén ez a folyamat viszonylag lassú, mivel az elgőzölgéséhez a párolgáshővel arányos hőenergiát kell a rendszerbe juttatnunk. Ahogy az előző fejezetben írtuk, minél nagyobb hányadban van jelen a gőz a rendszerben, a hőátadási tényező csökkenni fog. Ezt a fázisváltozást

viszont nem csak az entalpia növelésével, hanem a nyomás csökkentésével is végrehajthatjuk. Ez két módon következhet be: ha már a készülék fala a hőmérséklet- és nyomásnövekedés miatt nem bírja a mechanikai igénybevételt és felhasad, vagy ezt megelőzendő biztonsági szelepet telepítünk a tartályra. A szelepek automatikusan működnek, a beállított nyitónyomáson kinyitnak, lefújnak adott mennyiségű közeget, majd záródnak. Ezáltal csökkenti a gőztérben lévő anyag mennyiségét (így a nyomását is), a hőmérsékletet viszont nem. Ez a tűzterhelés miatt tovább növekszik. Ez a folyamat többször is bekövetkezhet, végül elérhet a rendszer egy olyan állapotba, amikor a nyitáspillanatokban a tenziógörbének megfelelően a közeg még folyadék állapotban van jelen, de ahogy a szelepen keresztül történő leáramlás csökkenti a rendszer nyomását, a nagy hőmérséklet miatt bekövetkezik a fázisátalakulás. Ez az instant folyamat oly mértékben megnöveli a belső nyomást, hogy a készülék nem felhasad, hanem szétrobban, az éghető gáz pedig meggyullad [11]. Jelen tanulmányban nem feltételeztük a BLEVE jelenségét.

2. VIZSGÁLT RENDSZER

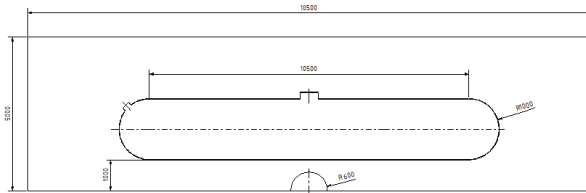
2.1. Vizsgált modell

A vizsgált tartálykocsi axonometrikus modellje a 4. ábrán látható.



4. ábra Vizsgált berendezés axonometrikus ábrája

Jelen tanulmány elkészítéséhez a kereskedelmi forgalomban kapható tartályok méretének felső tartományába tartozó tartályt vizsgáltunk, ahol a hengeres köpeny hossza 10500 mm, átmérője 2000 mm. Jelen tanulmányban a vázolt berendezés középsík metszetének hőmérséklet- és nyomásviszonyait vizsgáltuk. A karambol következtében a tartály alá került, majd kigyulladt autót egy 1200 mm átmérőjű félgömbbel modelleztük. A tartályon kívül természetesen az alvázat képző gerendákat is terheli a hőhatás, azonban tanulmányunk célja a berendezés belsejében és falában kialakult hőmérséklet állapot bemutatása volt. A 2D-s numerikus számításokhoz az 5. ábrán mutatott modellt alkalmaztuk.



5. ábra Vizsgált berendezés vizsgált keresztmetszete

A berendezés szükséges falvastagsága a nyomástartó edények számításánál alkalmazott kazánformulával lett meghatározva. Az LNG közeghez a korróziós szempontokat is figyelembe véve egy 1.4301 típusú ausztenites alapanyag lett kiválasztva. A tervezési paraméterek: 18 bar nyomás és 50°C hőmérséklet, melyek alapján a készülék falához 15 mm névleges vastagságú lemezt szükséges alkalmazni. A számításokhoz szükséges ismerni az a cél viselkedését is a hőmérséklet függvényében. Ellentétben a szénacélokkal, ezek esetén nem történik fázisátalakulás a tűzterhelés hatására az anyagszerkezetben, amely következtében a termikus anyagjellemzők is egyszerűbb polinomfüggvénnyel közelíthetők. A hővezetési tényező értéke a

$$\lambda = 0,0127T + 11,368 \quad (1)$$

míg az állandó nyomáson vett fajhő értéke a

$$c_p = -1,26 \cdot 10^{-4} T^2 + 2,98 \cdot 10^{-1} T + 380,19 \quad (2)$$

összefüggéssel számítható, melyek esetén a hőmérsékletet Kelvinben kell behelyettesíteni.

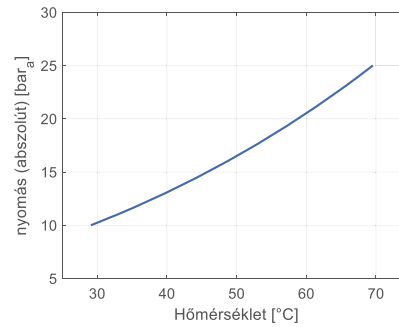
2.2. Cseppfolyósított földgáz

A vizsgáltunkban cseppfolyósított földgázt (liquefied natural gas) közeget vettünk a lapul. Ennek összetétele országonként eltérő lehet, ezért az átlagos összetétellel modelleztük. Az 1. táblázat tartalmazza az összetételt [12].

1. táblázat Cseppfolyósított földgáz átlagos összetétele

Vegyület	Összegképlet	Móltört
etán	C ₂ H ₆	2%
propán	C ₃ H ₈	95%
bután	C ₄ H ₁₀	3%

A nyomások számításához a lapvetően szükséges, hogy ismerjük a gőz-folyadék egyensúlyhoz tartozó értékpárokat. Az 1. táblázatban vázolt összetételhez tartozó egyensúlyokat a 6. ábra mutatja.



6. ábra Cseppfolyósított földgáz tenzióörbéje

A numerikus számítások során a nyomásértékeket a hőmérséklet függvényében polinom függvénnyel közelítettük, a z alábbi módon:

$$P = 0,0317T^2 - 1,611T + 216,4 \quad (3)$$

Hasonló módon jártunk el a szükséges anyagjellemzők tekintetében is. A hőátadás számításához a következő anyagjellemzőkre van szükség:

- dinamikai viszkozitás:

$$\eta = 4,04 \cdot 10^{-9} T^2 - 3,4 \cdot 10^{-6} T + 7,54 \cdot 10^{-4} \quad (4)$$

- hővezetési tényező:

$$\lambda = 3,07 \cdot 10^{-7} T^2 - 7,61 \cdot 10^{-4} T + 2,94 \cdot 10^{-1} \quad (5)$$

- állandó nyomáson vett fajhő:

$$c_p = 2,55 \cdot 10^{-1} T^2 - 1,36 \cdot 10^2 T + 2,08 \cdot 10^4 \quad (6)$$

- sűrűség:

$$\rho = -8,57 \cdot 10^{-3} T^2 + 3,5T + 2,14 \cdot 10^2 \quad (7)$$

Szükséges továbbá az üzemanyag párolgáshőjének és égéshőjének ismerete is. Ezek a hőmérséklet függvényében szintén változnak, de olyan kis mértékben, hogy elhanyagolható a változásuk. Szintén az összetétel függvényében a párolgáshő $\Delta H_v = 307 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$, míg az égéshő

$H_c = 47,3 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ értékkel vehető figyelembe [13]. Burgess

szerint [14] az égési sebesség a következő összefüggéssel határozható meg:

$$\dot{m}'' = \frac{C \cdot H_c}{\Delta H_v + c_p (T_b - T_a)} \quad (8)$$

ahol $C = 0,001 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}$, T_b a forráspontoz tartozó hőmérséklet, T_a pedig a környezeti hőmérséklet. Az összefüggés értelmében minél nagyobb felületen terül szét a baleset következtében a benzin, annál kevesebb idő alatt ég el. Ha feltételezünk egy 1200 mm átmérőjű tócsát, akkor egy átlagos személyautó üzemanyagtartállyal számolva is 33 s alatt fogy el az üzemanyag.

2.3. Cseppfolyósított földgáz

A hősugárzás folyamatát egy sugárzási hőátadási tényező értékével lehet figyelembe venni. A számításoknál az EN 1991-1-2:2005 szabvány (Eurocode1) előírásait alkalmaztuk [15], mely alapján a

$$\dot{q}_{rad} = \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma (T_r^4 - T_m^4) \quad (9)$$

ahol

- Φ a nézet faktor (geometriától függő tényező [16], jelen tanulmányban elhanyagoltuk) [-],
- ε_m a felület emisszivitási tényezője [-],
- ε_f a tűz emisszivitási tényezője [-],
- σ a Stefan-Boltzmann állandó $\left(= 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}\right)$,
- T_r a sugárzó felület hőmérséklete [K], és
- T_m a vizsgált felület hőmérséklete [K].

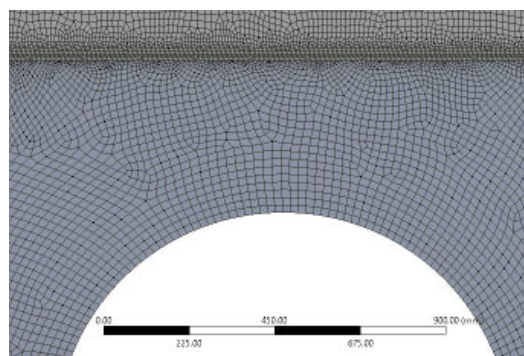
A tűz emisszivitásának értékéhez a hivatkozott szabvány $\varepsilon_f = 1$ értéket javasol alkalmazni, míg ε_m értékénél a sztenites acélra az EN 1993-1-2 szabvány 0,4 értéket javasol [17], azonban ezek a tartályok jellemzően festék védelemmel vannak ellátva, mely festékek $\varepsilon_m = 0,96$ emisszivitással jellemezhetők. A festékréteg belüli hővezetéstől, valamint a festékréteg és köpeny közötti érintkezési ellenállás jelenségétől eltekinthetünk.

Ez a tűzhatás azonban nem csak közvetlenül a lángoló felületről, hanem közvetett módon az aszfaltból is érkezik a tartály falára. Ezt az aszfaltrétegre előírt $\varepsilon_f = 0,93$ emisszivitási tényezővel lett figyelembe véve.

3. NUMERIKUS MODELL

A tűz hatására a tartálykocsiban és a körülötte kialakuló hő- és áramlási szimulációt a véges térfogatok módszerére épülő Ansys Fluent programmal végeztük el. Az égés részletes szimulációjával nem foglalkoztunk, a tűz leírására a szabványban előírt időben változó melegedési függvényt adtuk meg. A tartálykocsit egy külső környezetbe helyeztük el (5. ábra), melynek peremein: fent nyomáskimenetet, az oldalfalakon sebesség bemenetet, míg az alsó részén falat írtunk elő. A környezeti hőmérséklet 20°C, illetve azt tételeztük fel, hogy nincs szél, azaz a levegő sebessége mindenhol nulla. A számítási tartomány hálózásánál a tartály falazata és a tűz körüli területet sűrűbben hálóztuk be, így több, mint 288 ezer hexagonális elemet kaptunk.

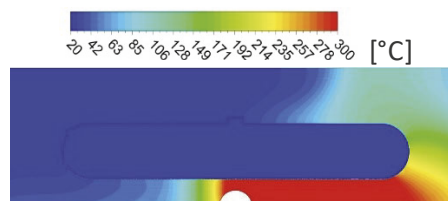
A háló függetlenségi vizsgálatot elvégeztük, a jelzett háló alkalmas volt a vizsgálatok elvégzésére.



7. ábra Az alkalmazott háló részlete

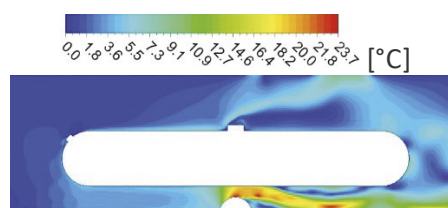
4. EREDMÉNYEK

A számításunk során egy 10 perces időintervallumot vizsgáltunk. A numerikus számításból kapott hőmérséklet-eloszlás a 8. ábrán látható. Az ábrán látható, hogy a környezet a tűz közelében akár 400°C-ra is felmelegedhet, míg a tartályban lévő LNG hőmérséklete alig változik (20,65°C átlaghőmérséklet). A tartály falának átlaghőmérséklete 64,5°C, azaz a tartály falazata kellően elvezeti a hőmérsékletet, és a benne szállított közeg hőmérséklete jelentősen nem változik 10 perc elteltével.



8. ábra Hőmérséklet-eloszlás 10 perc után

A 9. ábra a sebességeloszlást mutatja a tartályt körülvevő térben. A levegő hőmérséklete erőteljesen felmelegszik a tartály aljánál, így a közeg sűrűsége megváltozik és kialakul egy természetes konvekció, azaz a levegő felfelé kezd el áramlani, ami beleütközik a tartálykocsi aljába és oldalra elmegy. A levegő sebessége a tűz közelében közel 24 m/s sebességre is megnövekszik, ami elég erőteljes változás. Az ábrából látszik, hogy a 2D szimuláció nem elégséges a tartály felmelegedésének szimulálására, ezért következő lépésként 3D modellen szeretnénk elvégezni a számításainkat.



9. ábra Sebesség-eloszlás a tartály körül

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A számítások és numerikus eredmények alapján kijelenthető, hogy a vizsgált esetben, vagyis egy tartály alatt kigyulladt gépkocsi nem hordoz magában annyi energiát, hogy a tartályban káros nyomásnövekedést okozzon. A vizsgálatokat folytatni fogjuk, áttérünk háromdimenziós vizsgálati módszerre, ahol már az alvázszerkezet hőmérsékletprofilját is figyelembe fogjuk venni.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutatómunka részben a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatásával a K 134358 nyilvántartási számú projekt keretében valósul meg.

6. IRODALOM

- [1] <https://www.walb.com/2018/11/09/albany-wreck-causes-semi-truck-leak-ethanol-onto-road/> (letöltve: 2023.02.09.)
- [2] ECKHOFF, R. K., LI, G. “Industrial dust explosions. A brief review.” *Applied Sciences* (Switzerland), 11(4), 2021. 1–18. <https://doi.org/10.3390/app11041669>
- [3] EWBank, C., GUPTA, S., STEWART, B. T., KUSHNER, A. L., & CHARLES, A. (2019). *A systematic review of oil tanker truck disasters: Identifying prevention targets*. *Burns*, 45(4), 905–913. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2018.12.010>
- [4] LYU, S., ZHANG, S., HUANG, X., PENG, S., & LI, J. (2022). *Investigation and modeling of the LPG tank truck accident in Wenling, China*. *Process Safety and Environmental Protection*, 157, 493–508. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.10.022>
- [5] BARELLI, L., BIDINI, G., PERLA, M., PILO, F., & TROMBETTI, L. (2022). *Boil-off gas emission from the fuel tank of a LNG powered truck*. *Fuel*, 325. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124954>
- [6] ZHANG, L., & FENG, X. (2021). *Planning tank-truck hazardous materials shipments in intercity road transportation networks*. *Applied Mathematical Modelling*, 89, 1860–1880. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.09.009>
- [7] SHEN, X., YAN, Y., LI, X., XIE, C., & WANG, L. (2014). *Analysis on Tank Truck Accidents Involved in Road Hazardous Materials Transportation in China*. *Traffic Injury Prevention*, 15(7), 762–768. <https://doi.org/10.1080/15389588.2013.871711>
- [8] HEDAYATI, E., HEDAYATI, A., & VAHEDI, M. (2015). *Critical buckling load analysis of truck chassis using arclength method*. *Journal of Engineering Research*, 3(2), 129–140. <https://doi.org/10.7603/s40632-015-0018-3>
- [9] DE, S., SINGH, K., SEO, J., KAPANIA, R. K., OSTERGAARD, E., ANGELINI, N., & AGUERO, R. (2021). *Lightweight chassis design of hybrid trucks considering multiple road conditions and constraints*. *World Electric Vehicle Journal*, 12(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/WEVJ12010003>
- [10] MA, T., WANG, Z., YANG, J., HUANG, C., LIU, L., & CHEN, X. (2022). *Real-time risk assessment model for hazmat release accident involving tank truck*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104759>
- [11] ECKHOFF, R. K. (2014). *Boiling liquid expanding vapour explosions (BLEVEs): A brief review*. In *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* (Vol. 32, Issue 1, pp. 30–43). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.06.008>
- [12] RODRÍGUEZ-ANTÓN, L. M., GUTIÉRREZ-MARTÍN, F., & MARTINEZ-AREVALO, C. (2015). *Experimental determination of some physical properties of gasoline, ethanol and ETBE ternary blends*. *Fuel*, 156, 81–86. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.040>
- [13] S. SARIKOÇ, “Fuels of the Diesel-Gasoline Engines and Their Properties,” *Diesel and Gasoline Engines*, Feb. 2020, doi: 10.5772/intechopen.89044.
- [14] D. BURGESS, A. STRASSER, J. GRUMER, *Diffusive burning of liquid fuels in open trays*, *Fire Research Abstracts and Reviews*, Pittsburg, PA, 3 (1961) 91-106.
- [15] MSZ EN 1991-1-2:2005, Eurocode 1: A tartószerkezeteket érő hatások. 1-2. rész: Általános hatások. A tűznek kitett szerkezeteket érő hatások.
- [16] KUMAR GUPTA, M., BUMTARIYA, K. J., SHUKLA, H. A., PATEL, P., & KHAN, Z. (n.d.). *Methods for Evaluation of Radiation View Factor: A Review* www.materialstoday.com/proceeding
- [17] MSZ EN 1993-1-2:2013, Eurocode 3: Acélszerkezetek tervezése. 1-2. rész: Általános szabályok. Szerkezetek tervezése tűzhatásra.

FDM NYOMTATÁSSAL KÉSZÍTETT MŰANYAG ALKATRÉSZEK CSAVAROS CSATLAKOZÁSÁNAK VIZSGÁLATA

TESTING BOLTED CONNECTIONS IN PLASTIC PARTS MADE BY FDM PRINTING

Dr. János Bihari, Imre Marada***

ABSTRACT

FDM and MSLA printing are no longer used as just a tool for prototyping, but many working parts can be produced using these manufacturing technologies. The mechanical properties of these type of parts depend on a number of factors and cannot be as clearly defined as for example, injection molded parts. Since components are often fastened by bolted connections, it is important to know what tightening torques and clamping forces should be used for different materials, in different planes and with different filling ratios. In this research, we aimed to find answers to the question of what clamping forces can be achieved in FDM printed parts with different designs of threaded connections.

INTRODUCTION

3D printing is becoming increasingly important in highly automated industrial processes. While these processes were previously used mainly for prototyping, 3D printing is now increasingly used to produce machine parts, making 3D printers a key tool in more and more maintenance workshops. One reason for this is that automated systems very often require the use of parts with complex geometries, e.g., for gripping or positioning tasks. In such cases, the faster failure of printed plastic parts is more often compensated by their virtually unlimited availability, and for difficult-to-produce geometries, their lower unit cost compared to conventional technologies. The more interesting reason for our research, however, is that the mass of these parts can be optimized to a considerable degree. The optimization of mass, which here typically means creating hollow bodies. The layered structure of FDM-printed parts means that pre-stressed joints, such as bolted joints, often work differently to those made by machining or injection molding.

1. TESTS ON BOLTED JOINTS

Bolted joints can be analyzed from many different aspects, but our research is mainly concerned with the characteristics that can be tested according to the ISO 16047 [1] and JIS 1084 [2] standards and the loosening of bolted joints over time and use.

To determine under which conditions a bolted joint can safely perform its function of creating a force-locking and, where appropriate, a form-locking joint between different elements; we need to know how much clamping force a bolted joint can generate [3]. It is also essential to know how this clamping force can be adjusted based on easily measurable parameters.

The most common method is to measure the tightening torque, because in theory, this always involves a given clamping force for a given screw and thread characteristic.

Basically, we have a number of guides and guidelines to help us, which give the maximum tightening torque and the theoretical clamping force, that can be generated for different sizes and bolt configurations.

However, the real clamping force can be significantly different from a theoretical one.

The main factors affecting the real clamping force:

- Utilization of the bolted connection as a function of the yield strength
- Strength characteristics of assembled components
- Friction of the bolt heads/nuts/washers
- Friction of threads
- Method of assembly
- Setting phenomena

Therefore, if significant deviations of up to 20 per cent of the nominal clamping force are not permissible for a bolted connection; it is advisable to check by tests how much clamping force the bolted connection can generate under the given conditions, when tightened with the given tightening torque and what the force variance is.

The most commonly used test method for this is a test carried out according to ISO 16047 [1]. Since this method is perfectly suited to the type of bolted joints we want to test, we will use it in our research.

However, for hollow 3D-printed parts, it is typically not enough to determine how much clamping force a bolt joint can generate, we also need to know how this force changes over time. One important influencing factor is the "setting" of materials, i.e., the smoothing of surface roughness when tightened, which reduces the thickness of the material between the nut and the bolt head. Another is the flow and deformation of plastics, which can lead to a significant reduction in clamping force over time.

As the use of such components in e.g., robots offer significant advantages, deformation and setting phenomena are increased by the high accelerations to which they are subjected in these applications.

* Associate Professor, University of Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, 3515, Miskolc, Hungary

** PhD Student, University of Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, 3515, Miskolc, Hungary

In addition, for materials typically used for 3D printing, it cannot be ignored that temperature fluctuations, which are still insignificant for metals, can significantly affect the strength of materials. Thermal expansion can increase the tendency of the bolted joints to loosen.

Therefore, the bolted joints used for such components should be examined in a more complex way.

In our research, we first analyze the relationship between the tightening torque and the generated clamping force for different layouts and thread machining methods. We then conduct experiments to determine the reduction in clamping force.

2. THE STRUCTURE OF THE TESTS

2.1. Investigating the relationship between tightening torque and clamping force

For this test we use measuring instruments that comply with the tests according to ISO 16047. The tightening torque is provided by a geared servomotor (fig. 1 pos. 1), the torque is measured by a rotating torque measuring cell (fig. 1 pos. 2) [4], the clamping force is measured by a spatially compensated ring load cell (fig. 1 pos.3) [5]. Thanks to the design of the tool, tightening can be carried out with conventional tools as well as with precision clamping tools. It is thus possible to determine the extent to which the conventional, square, or hexagonal connections of the wrenches affect the accuracy of the tightening.

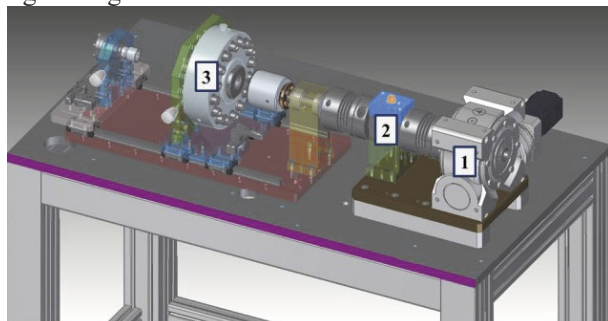


Figure 1. Test bench for investigating torque-clamping force

2.2. Investigation of setting and static deformation

To do this, a total of 28 assembled units are placed in a constant temperature location. Every day for a week, we check for any detectable loosening of the bolted joints by inspecting another 4 units each day. If the results of the test show that it makes sense to test longer time intervals, we will repeat the experiments.

2.3. Investigating the effects of temperature

The assembled units are stored at different temperatures, varying the temperatures, e.g., to simulate the transfer from a hot warehouse to a temperate manufacturing area.

2.4. Stress tests

The assembled parts are mounted on a three-axis linear robot. The parts are subjected to different accelerations and decelerations. The number of cycles is predefined at 1000 and 5000 cycles. Based on the experience gained from the experiments, we will probably have to define new cycle numbers.

A temperature related experiment is also included in this test. It is common for robots to move close to higher temperature points, e.g., furnaces or pipes carrying hot materials, in which case the local temperature difference can be as high as 30 °C. A heat source with such a temperature difference is placed in the robot's movement space.

2.5. Determination of loosening

The tools described in section 2.1 are used to determine the loosening. The measurement of loosening torque is often used to examine loosening, but this is in fact a very inaccurate method with a large standard deviation. We therefore check for loosening by retightening bolted joints. We measure how many turns the tool will make before the original tightening torque is reached, if applicable, i.e., if there has been loosening.

3. THE COMPONENTS USED FOR THE TESTS

The most important parts of the tests are the components used to measure the clamping force. These are sample parts that have some of the characteristics of the parts used in everyday life. The most important of these features is the design of the threaded connections.

3.1. Typical thread designs of FDM 3D printed parts

The following figures show the threaded connections that are typically used to fasten FDM 3D printed parts.

In Figure 2, the thread was printed. This is the simplest solution in terms of work required, but the quality and load-bearing capacity of the threads is highly dependent on the thread size and print settings. Generally speaking, only larger threads can be produced in this way with acceptable quality. The smallest possible layer thickness should be set when slicing.

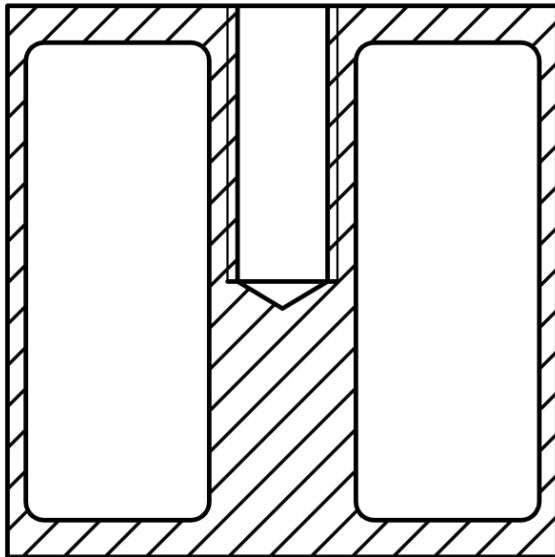


Figure 2. Printed thread.

Figure 3 shows a thread made with a threading tap. In this case, thread machining is required in addition to printing, so it requires slightly more work and tools than a printed thread.

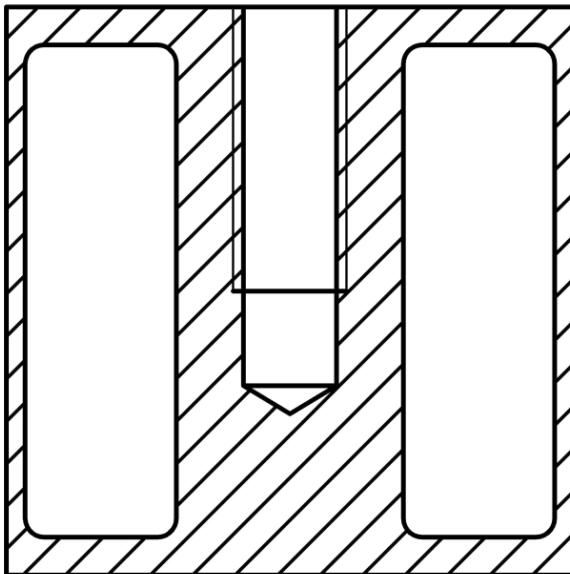


Figure 3. Machined thread.

Figure 4 shows a threaded insert inside the part for plastic parts. These inserts can be press-fitted or threaded into a finished thread. Again, the tooling and work requirements are greater than for printed threads, but these threads are of the highest quality. However, the mass of the metal inserts adds to the weight of the part.

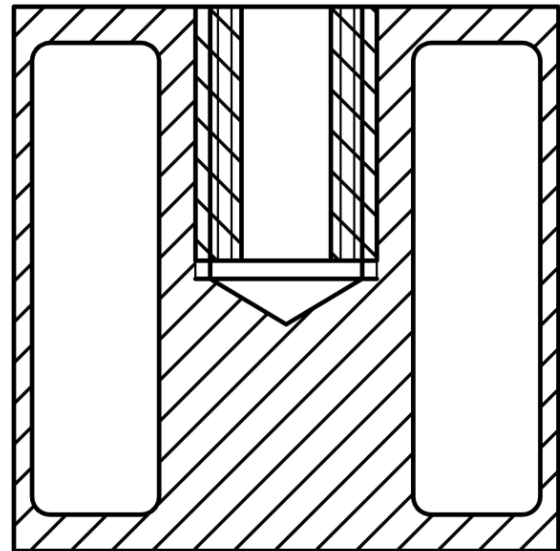


Figure 4. Threaded insert.

In Figure 5, the thread is not in the part. This is used in cases where the bolt heads or countersinks do not affect the operation of the part.

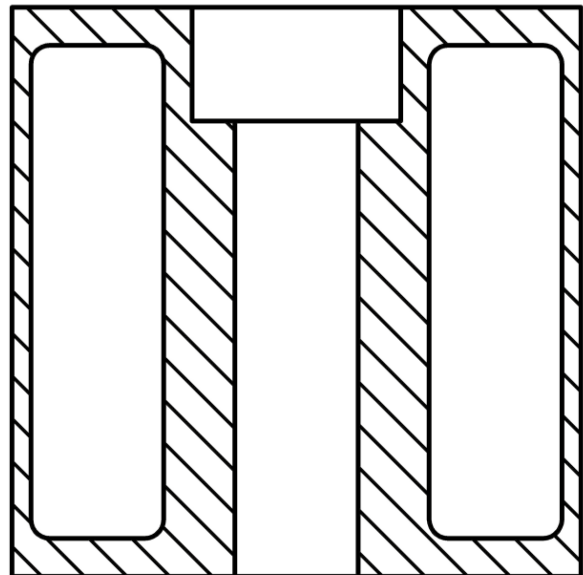


Figure 5. No thread.

We will design and manufacture parts for the tests with the thread designs listed here.

3.2. Additional design aspects of components used for testing

The components must fit into the load cell used to measure the clamping force and must allow the bolt to be tightened in the cell.

Deformations of the components should not affect the results of the measurements.

The components shall be so designed as to allow their removal from the load cell and after an appropriate waiting period and/or load tests, their proper reinsertion for the loosening test.

4. SUMMARY

This article describes the factors to be considered when testing threaded connections in FDM 3D printed parts. The increasingly common applications for such parts are presented, as well as the factors that we intend to investigate. We describe the instrument we intend to use to measure the clamping force under a given tightening torque and the tests we will perform in addition. The most common thread configurations for such components are listed. At the end of the article, we summarize the basic properties that the components used for testing should have.

5. REFERENCES

- [1] ISO 16047:2005 Fasteners — Torque/clamp force testing
- [2] JIS B 1084:2007 Fasteners — Torque/clamp force testing
- [3] Hofmann, S.: Möglichkeiten zum Erfassen der Schraubenvorspannung mit Dehnungsmessstreifen, Institutsmitteilung Nr. 39, IMW Clausthal, 2014.
- [4] Torque measurement technology from HBM, A New Dimension of Precision for optimum results in torque measurement, , HBM Public, 2021.
- [5] Reliable Force Measurement HBM force transducers for industry and research, HBM Public, 2022.

BUSZ HŰTÉSI RENDSZEREK ÁTTEKINTÉSE AZ ÁTALAKÍTÁSI FOLYAMATBAN

REVIEW OF BUS COOLING SYSTEMS IN THE CONVERSION PROCESS

*Péter Bencs**

ABSTRACT

The primary objective of this research is to investigate cooling/heating solutions for an urban passenger bus engine and battery plant (for electric drive). A general literature review was conducted to assess the thermal performance expected in a sizing process. In the context of literature, an electrical conversion was also examined to see what cooling system is used for internal combustion engines, what system is replaced and what solution is applied. In the research framework, we tried to find specific thermal performance values for a bus (urban passenger bus) defined in the assignment. The next step of the research was to explore the methods used for cooling internal combustion engines. As a final step in the literature review, the cooling and heating solutions for battery packs used in electrical conversion were considered (maintaining the optimum temperature range of battery packs).

1. INTRODUCTION

Outdoor air pollution, in particular particulate matter less than 2.5 mm (PM_{2.5}), is estimated to cause 3.3 million premature deaths worldwide each year. Exhaust emissions from diesel vehicles are particularly harmful to human health and have been classified as carcinogenic by the World Health Organization.

Generally speaking, the growing knowledge of the negative effects of air pollutants has led to active and continuous regulatory measures to limit emissions and technological improvements in emission control techniques, particularly in road transport. Exhaust emissions from buses and coaches in real-world operations depend on several factors, such as the vehicle's technical condition, the type of vehicle, the type of bus and engine, the type of fuel and lubricant, driving requirements and environmental conditions [1].

Buses, like other vehicles, typically have higher emissions when accelerating from, for example, bus stops. Localized emissions can create air pollution hotspots in parts of a city bus route. Diesel Particulate Filters (DPFs) are typically ceramic filters used in Euro

VI diesel vehicles to remove soot particles in the exhaust system of buses. Exhaust Gas Recirculation (EGR) or Selective Catalytic Reduction (SCR) systems have been used to reduce Nitrogen Oxide (NO_x). The use of an ammonia-reducing agent achieves NO_x reduction in SCR. Ammonia is usually produced by hydrolysis of a urea solution which is injected into the hot exhaust gas before SCR. As mentioned, current emission control strategies are largely based on exhaust gas after treatment. This strategy offers the possibility of reducing emissions by retrofitting existing buses. Compared to buses with similar DPFs operating under similar driving conditions, buses equipped with DPF-SCRs had 61% and 45% lower NO₂ and NO_x emissions, respectively [1].

Electrification of buses is being introduced to reduce carbon emissions by replacing buses using conventional internal combustion engines and diesel fuel as a power source. Trials have shown that battery electric buses can minimize CO₂ emissions by 18.0-23.9% compared to diesel buses using low HVAC. Biofuel and electrified buses can reduce carbon emissions by up to 37%, while full electrification could avoid 52% of carbon emissions. Because of their undisputed benefits in reducing air pollution, electric buses are increasingly being used to replace conventional buses, and many countries are beginning to introduce electric buses into public services to reduce carbon emissions and urban air pollution [2].

Electric buses are emerging as a new transport trend as they have great potential to reduce carbon emissions and avoid severe urban air pollution compared to diesel buses, but there are also barriers to their introduction [2].

The energy storage of electric buses is limited, leading to shorter travel distances for electric buses compared to diesel buses. Increasing battery capacity does not help as it increases not only the cost but also the mass load of the bus. The limited range and energy storage may cause insufficient energy during the service period, as the operating time and travel distance of public buses are fixed [2]. Electric buses also need more time to recharge energy storage than diesel buses. The long charging time for electric buses makes it more challenging to schedule. Forecasting energy consumption is key to estimating the

**associate professor, director of institute, Department of Fluid and Heat Engineering, Institute of Energy Engineering and Chemical Machinery, University of Miskolc*

energy required by the electric bus and helps in scheduling [2].

In this research study, the cooling and heating solutions used in buses undergoing conversion (conversion of a diesel engine system to an electric motor system) are presented as one of the cornerstones between the two bus types.

2. CONVERSION OF CITY BUSES

The following example shows the conversion options (from diesel to electric system).

e-troFit, a Munich-based in-tech technology company subsidiary, made its debut at the UITP summit in Stockholm, demonstrating retrofitting for city buses. For the time being, the e-troFit kit is only available for the Mercedes Citaro [3].

e-troFit would allow operators to quickly convert conventional diesel buses into electric vehicles. e-troFit has entered into a partnership with ZF Aftermarket: ZF is a system supplier of powertrain components for the e-troFit kit. Specifically, the component is the AxTrax electric motor axle built into the wheel, which Mercedes and Solaris have adopted for their eCitaro and Urbino electric vehicles. ZF is also a partner for retrofitting and servicing, through its global workshop network.

The first demonstration vehicle equipped with the e-troFit kit is a Mercedes Citaro, which has undergone a test period as part of a pilot project with the German municipal operator Stadtwerke Landshut.

The company points out that the first e-troFit conversion kit is already available for the Citaro I Solobus city bus. For city buses, e-troFit kits are planned for the Citaro II Solobus (from mid-2020) and the Citaro II articulated bus (from Q4 2020). e-troFit also plans to offer kits for other city buses from other manufacturers, according to e-troFit.

According to e-troFit, a conversion is on average 50% cheaper than a new vehicle with electric propulsion. So, the operation would cost almost as much as buying a new Euro VI bus. Of course, the price depends on several elements, such as, in particular, the battery capacity (which can be adapted to the operator's needs). The modular lithium-ion battery modules based on NMC (nickel-manganese-cobalt) (60 kWh each, the desired capacity can be achieved by connecting them in parallel) are installed in the former internal combustion engine compartment. If a larger battery capacity is required, part of the battery can be installed on the roof. This would require some reinforcement work on the bodywork [3].

The e-troFit solution has been awarded the German Mobility Prize by the German Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure.

The price of e-troFit retrofit kits, including the electric conversion of diesel buses, ranges from around €300 000 to €360 000, depending on the vehicle model and range requirements.

In Germany, city buses cover an average of 150-180 km per workday. A converted electric bus with a range of around 250 km could replace diesel-powered city buses without restriction. No time-consuming rerouting is needed.

The following components are replaced during the conversion [4]:

Drive train and battery: the diesel engine, gearbox and drive shaft are removed. For the electric drive, a new drive shaft is installed. The ZF (AVE130) electric low-floor portal shaft is used for city buses. It has two electric motors close to the wheels. The battery is installed in the newly won space (engine compartment). If required, additional battery capacity can be installed on the roof.

Auxiliaries: all auxiliaries previously driven by the internal combustion engine, such as the air conditioning system, air compressor, pumps, and radiator, are removed and replaced by electrically driven components. An optimal control system that takes over the operation of these components guarantees the most efficient use of energy.

Driver's cab: An additional display is installed in the driver's cab to inform the driver of the vehicle's status, charge level and any faults.



Figure 1. e-trofit Bus [4]

The electric portal axle of the ZF AxTrax Ave is used in city buses: the drive is provided by a compact, high-speed, and liquid-cooled synchronous motor per wheel, so that the axle's weight with the integrated motors remains low. The motor has a maximum power of 250 kilowatts and a maximum torque of 22 000 Nm.

Since neither a separate motor nor a cardan shaft is required, space requirements and vehicle weight are reduced. The space saved allows the installation of a

more powerful battery or the optimization of the vehicle's interior to carry more passengers. The AxTrax Ave requires no special wheel components. This means that the tire and rim combinations used on conventional buses can be used, as well as conventional disc brakes. The brakes are in the same maintenance-friendly position as on normal axles.

Road registration - a vehicle converted with an e-retrofit kit is delivered ready for operation and road registration [4].

3. COOLING AND HEATING SYSTEM FOR BUSES

A traditional heating and cooling system is shown in the following figure.

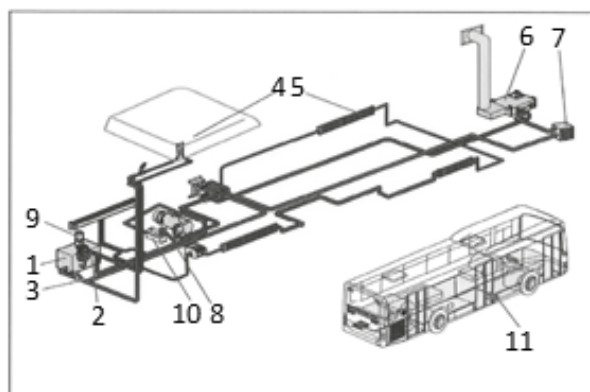


Figure 2. Volvo 7000 bus (Diesel bus) heating and cooling system [5]

The following components are found in a typical bus's heating and cooling system (as shown in Figure 2.).

1 - engine; 2 - heating forward line shut-off valves; 3 - main shut-off valves in the return line; 4 - roof unit; 5 - passenger compartment heaters; 6 - dehumidifier (air mixer for the cab); 7 - heating for the cab; 8 - heating unit; 9 - a auxiliary heating system pump; 10 - flow-through electric water heater; 11 - electric heater

Heating and ventilation example data (Volvo 7900 Diesel – 12 m bus) [6]:

The bus has a water heating system with 2-tube heating radiators and fans, which can be controlled manually or automatically. There is an Additional heater for engine preheating, dehumidification, and passenger compartment heating. The heater has a pre-programmable (7-day programming option) clock. The bus has a built-in heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) system to ensure a comfortable temperature.

- Convector heating:
 - Power: 551 W/m.
- Fan heating for cab and front door, baby area and second door: data per fan:

- Power: 2.8 kW.
- Total power of convectors (including fans): 2.1-3.4 kW, depending on specification.
- An auxiliary heater heats the passenger compartment, defrosts the windscreen and preheats the engine. A 7-day timer is available for programming the heater.
 - Auxiliary heater capacity: 30 kW.
 - Fuel consumption: 4.0 kg/h.
 - Auxiliary heater fuel tank: 40 l.
- Cooling, heating air conditioning system for cooling the passenger compartment.
 - AC cooling capacity (passenger compartment): 33.7 kW.
 - Heating power: 46 kW.
 - Roof-mounted driver air conditioning: 3.5 kW.

It should be noted that the thermal energy demand of the heating system is primarily provided by the cooling system of the internal combustion engine (apart from the auxiliary heating system).

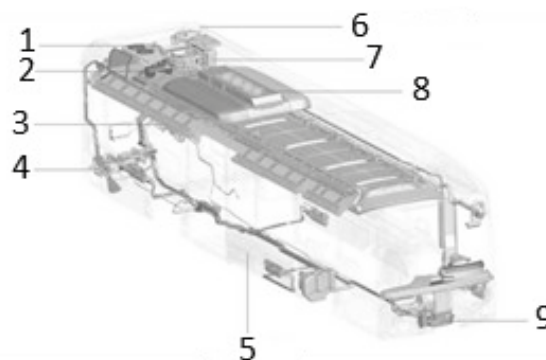


Figure 3. Thermal management architecture of the EvoBus eCitaro (full Electric bus) [7]

The components relevant to the internal heating are the CO₂ heat pump (8) on the top of the bus, the rear brake resistor (3), the rear auxiliary heater (4), the underfloor heating (5) and the front box (9). Additional elements in the system: battery cooler (1), compressor HVAC (2), expansion tank (6) and cold-water chiller (7). The roof-mounted CO₂ heat pump injects heat into the interior via the airflow from above, into the passenger compartment. A braking resistor is used to heat the interior, energy recovery and emergency braking. The auxiliary heater is a fuel heater burning diesel fuel (or biodiesel fuel for second-generation heaters). The auxiliary heater may be used at very low temperatures when the heat capacity of the heat pump is insufficient, and no additional electrical energy is required for heating to maintain the range of the bus. In order to transfer the heat from the brake resistor and the auxiliary heater to the vehicle's interior, both are connected to a coolant circuit. The coolant circuit is

connected to the floor heaters in the passenger compartment and to the front box in the driver's cab, which are heat exchangers used to transfer the coolant heat into the passenger compartment [7].

Heating and ventilation example data (Volvo 7900 Electric – 12 m bus) [8].

- Roof mounted HVAC unit (heating, ventilation, and air conditioning, including heat pump function).
- Pipe convectors and air blowers.
- Air blowers at doors.
- Defrosting with air conditioning.
- Auxiliary diesel/electric heater.
- Separate air conditioning zones for drivers and passengers.
- The passenger compartment temperature is controlled by a pre-set optimization function for optimum climate and energy efficiency.
- The temperature in the driver's cabin can be manually adjusted.

Roof heating mode:

- 28 kW Wet heating circuit.
- 9 kW Heat pump (air/air).

AC mode (humidity - 35/40/47%): 25 kW.

Defroster (defrosting):

- Heating (differential temperature: 80 °C) 18 kW.
- Cooling 5,5 kW.

Ducted air conditioning:

- Electric roof-mounted air conditioner connected to the defroster.
- Standard equipment: defroster connected to the passenger compartment air conditioning system.

Auxiliary heating:

- Fuel (Diesel/Biodiesel) 16 kW.
- Electric 14 kW.

Comparing the two data systems shows the difference for the new electric buses (heating/cooling heat demand). It is important to point out that the heat demand for the battery packs needs to be discussed in the context of electric buses.

As battery use has grown, the efficient storage and energy extraction from batteries have become the foreground. Furthermore, among some other parameters, the operating temperature of an electric vehicle battery plays an important role in its performance [9].

Internal heat generation also limits the performance of lithium-ion batteries. The operating temperature range of electric vehicle lithium-ion batteries is between 15°C and 35°C, which is maintained by the battery thermal management system (BTMS).

The effect of temperature on battery performance:

Battery cells lose more than 60% of their initial performance after 800 cycles at 50°C and 70% after 500 cycles at 55°C. Cycle life Li-ion battery life at 45°C is 3323 cycles, which drops significantly to 1037 cycles at 60°C. This suggests that temperature has a significant

effect on the cycling life and energy capacity of the battery.

The BTMS is the battery's thermal management system, essentially the brain of the battery. BTMS can be classified primarily based on power consumption, heat consumption, heat transfer medium and coolant to battery contact. Air cooling, liquid cooling, and phase change material (PCM) cooling are the conventional techniques [9].

- Air-cooled BTMS

- o Air cooling is the natural method of cooling the battery and can be further classified as free and forced convection cooling. The main advantages are simplicity, low cost, electrical safety, lightweight, no leaks, easier maintenance, etc.

- Liquid-cooled BTMS

- o Liquid cooling gives better thermal performance and cooling efficiency. It is the most common technique for directly or indirectly cooling batteries (used in contact with a coolant).

- PCM-based BTMS

- o Due to the high latent heat, PCMs can absorb a huge amount of heat generated by Li-ion batteries and reduce the temperature of the battery cells while keeping them within the melting range of the PCM.

- Heat-Pipe-based BTMS

- o Heat pipe (HP) based passive TMS have been widely used in recent years for temperature control of batteries. Heat pipes are heat transfer devices filled with small amounts of liquid.

- Hybrid BTMS

- o The literature shows that air, liquid, PCM, HP and ammonia cooling can maintain the thermal management of a battery. Keeping the battery pack within the desired thermal management range has been observed, but it has also been observed that the limitations of a single technique, limit the best possible performance - thermal management. A combination of two or more cooling methods should be used to integrate the advantages and overcome the disadvantages. Cooling systems, called hybrid cooling, have been studied and developed by researchers.

- Other battery cooling techniques

- o More recently, hydrogels, cold hydrogen plates, vortex generators, thermoelectric coolers, etc., have been used to manage the heat in batteries and battery packs.

It is important to note that not only cooling but also heating needs to be given a lot of attention.

A notable feature of Li-ion batteries at sub-zero temperatures is a significantly reduced discharge capacity. At -10°C, a 2.2 Ah capacity of 18650 cylindrical cells could only maintain a discharge capacity of about 1.7 Ah at a discharge rate of 1C, and a lower

discharge capacity could be achieved at higher discharge rates (about 0.9 Ah at 4.6C). A reduced discharge capacity would reduce the energy provided by the battery [9].

Different preheating techniques are briefly described below [9].

- Liquid heating
 - o Compared to air, liquid has a higher heat transfer efficiency, resulting in better inter-cell temperature uniformity. Therefore, the liquid is widely used as a heat transfer medium in BTMS systems.
- Conduction heating
 - o In conductive heating, the heat source elements directly interact with the Li-ion cells or modules. Therefore, the heat generated by the heating elements can be conducted directly to the battery cells and heat them up, reducing heat loss in the heat transfer path.
- Internal heating
 - o Internal heating typically takes advantage of the high impedance of low-temperature batteries to generate large amounts of electrochemical heat inside the cells when current is applied.

The issue of heating and cooling solutions for electric buses is more complex. In addition to the driver and the travelling passengers, attention must also be paid to the proper temperature control of the battery pack.

4. SUMMARY

This study investigated the heating/cooling solutions of a conventional combustion engine bus (diesel) and an electric bus. The typical parameters of the heating/cooling solutions under investigation are also presented, which allow an approximate estimation of a new conversion process. The present work is a preliminary study that estimates the heating/cooling requirements for converting an old/conventional internal combustion engine city bus. In addition, the possible solutions between different heating and cooling solutions are of particular interest. In a joint project (unfortunately, due to the specific nature of the project, it contains confidential information, so we cannot describe the conversion process and its parameters in detail in this study), the preliminary design of a heat pump provides complete heating, and the cooling solution was considered. The bus to be converted in this project is of a completely similar size and performance as the buses presented in chapter 3, so we expect very good operating parameters from the selected heating/cooling solution. A particular highlight of the conversion is the possibility of accommodating battery packs. In the case of all-electric buses (new build vehicles), the battery packs have a predefined regular and well-cooled/heated location.

However, the project under study has irregularly placed battery pack systems in several locations, so a complex solution for heating/cooling had to be applied. The project involves rebuilding a converted bus that can be used in Hungarian traffic.

6. REFERENCES

- [1] Järvinen, A., Timonen, H., Karjalainen, P., Bloss, M., Simonen, P., Saarikoski, S., Kuuluvainen, H., Kalliokoski, J., Dal Maso, M., Niemi, J. V., Keskinen, J., & Rönkkö, T. (2019). Particle emissions of Euro VI, EEV and retrofitted EEV city buses in real traffic. *Environmental Pollution*, 250, 708–716. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.033>
- [2] Lim, L. K., Muis, Z. A., Ho, W. S., Hashim, H., & Bong, C. P. C. (2023). Review of the energy forecasting and scheduling model for electric buses. *Energy*, 263, 125773. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125773>
- [3] Editorial. (2019, June 24). E-trofit turns ice into electric buses. with ZF powertrain. *Sustainable Bus*. Retrieved February 14, 2022, from <https://www.sustainable-bus.com/components/e-trofit-turns-ice-into-electric-buses-with-zf-powertrain/>
- [4] Umrüstung Bus und LKW - von Diesel auf Elektro mit pepper. (n.d.). Pepper Motion. Retrieved February 14, 2022, from <https://www.peppermotion.com/produkte-loesungen/umruestung/>
- [5] Karty ratownicze RT - Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej - Portal Gov.pl. (n.d.). Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej. Retrieved February 15, 2022, from <https://www.gov.pl/web/kgpsp/karty-ratownicze-rt>
- [6] volvo 7900 - [PDF Document]. (n.d.). Cupdf.com. Retrieved February 15, 2022, from <https://cupdf.com/document/volvo-7900.html?page=1>
- [7] Kraft, W., Stahl, V., & Vetter, P. (2020). Thermal Storage Using Metallic Phase Change Materials for Bus Heating—State of the Art of Electric Buses and Requirements for the Storage System. *Energies*, 13(11), 3023. <https://doi.org/10.3390/en13113023>
- [8] Specifications Volvo 7900 Electric. (n.d.). www.volvobuses.com. Retrieved February 15, 2022, from <https://www.volvobuses.com/en/city-and-intercity/buses/volvo-7900-electric/specifications.html>
- [9] Tete, P. R., Gupta, M. M., & Joshi, S. S. (2021). Developments in battery thermal management systems for electric vehicles: A technical review. *Journal of Energy Storage*, 35, 102255. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102255>

3D NYOMTATOTT IPARI MŰANYAGOK ANYAGVIZSGÁLATA A MŰSZAKI GYAKORLATBAN

MATERIAL TESTING OF 3D PRINTED INDUSTRIAL PLASTICS IN TECHNICAL PRACTICE

Molnár Tamás Géza*, Zsótér Brigitta**

ABSTRACT

Our research was made with the 3D printing the mechanics characteristics of plastic components, concerned they examines the opportunities of his technical application. We put tearing test bodies on with different printing technologies to this, from different stocks and made change in with printing parameters. It was ready test bodies onto the plastics valid, ISO we submitted it to a tearing examination pulled according to 527 standards. The stock we compared the results of examinations with the tearing solidity of the die-cast products, based on what the capacity of components was made with the 3D printing averagely 25-35%-al lower. The productivity differences compared to the die-cast, concerned because of the form freedom of the printing the printing technology primarily small series and merchandising test production means a suitable solution in his case. The collected results serve as a basis onto the printing to the modeling of planned components and his sizing.

1. BEVEZETÉS

A XXI. században a technológia fejlődése megköveteli a mesterséges mérnöki anyagok teljesítőképességének növekedését. A mérnökök által megtervezett konstrukciók kialakításának és teherbíró képességének a felhasznált anyagok tulajdonságai szabnak határt [1]. A gépészeti tervezők eszköztárát nagymértékben szélesítik a napjainkban is folyamatosan fejlődő kompozit anyagok [2], amelyek alkalmazásával egyes szerkezetek, berendezések nagyobb hatékonysággal és élettartammal üzemelhetnek [3]. Ebből a szempontból kiemelkedően fontos szerepe van a polimer szerkezeti anyagoknak [4] [5] [6], amelyeket egyéb polimerekkel, fémekkel vagy kerámiákkal társítva nagyteljesítményű kompozit struktúrák állíthatók elő [7].

Kutatásunk a 3D nyomtatással készült műanyag alkatrészek mechanikai tulajdonságait [8] [9], illetve azok műszaki alkalmazásának lehetőségeit vizsgálja [10] [11]. Ehhez szakító próbatesteket készítettünk eltérő nyomtatási technológiákkal, különböző alapanyagokból

és változtatott nyomtatási paraméterekkel. Az elkészült próbatesteket a műanyagokra érvényes, ISO 527 [12] szabvány szerinti húzva szakító vizsgálatnak vetettük alá. Az alapanyag vizsgálatok eredményeit a fröccsöntött termékek szakító szilárdságával vetettük össze [13], ami alapján a 3D nyomtatással készült alkatrészek terhelhetősége átlagosan 25-35%-al alacsonyabb. A fröccsöntéshez viszonyított temelékenységi különbségek, illetve a nyomtatás formabeli szabadsága miatt a nyomtatási technológia elsősorban kisszerű és termékfejlesztési próbagyártás esetében alkalmas megoldást jelent [14] [15]. A gyűjtött eredmények alapul szolgálnak a nyomtatásra tervezett alkatrészek modellezéséhez és méretezéséhez.

A mindennapi és a műszaki életben is egyre nagyobb mennyiségben alkalmaznak polimereket, piacuk az évtized elején lezajlott gazdasági válságot követően újra növekedésnek indult. Az erősítetlen polimerek mellett a kompozitok is egyre nagyobb népszerűségnek örvendenek, köszönhetően annak, hogy kis sűrűségük mellé viszonylag nagy szilárdság párosul. A növekvő igény nem csak a térhálós mátrixú kompozitokat érinti, hanem a hőre lágyuló kompozitokat is [16], hiszen ezekből az anyagokból viszonylag kevés energia befektetéssel, könnyen lehet nagy mennyiségben különféle háromdimenziós termékeket előállítani fröccsöntés segítségével, melyek gyártási pontossága is jobban beállítható a száltartalomnak köszönhetően [17] [18].

Kutatásunk célja a 3D nyomtatással készült műanyag alkatrészek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata, a kapott eredmények alapján bővebb információt nyerni a technológia alkalmazásának lehetőségeiről és korlátairól a jelenleg legelterjedtebb műanyag gyártó eljárásokhoz képest. A kísérlet során fröccsöntött műanyag termékek vizsgálataira alkalmazott szabványos [12] próbatesteket készítettünk különböző 3D nyomtatási technológiákkal, különböző 3D nyomtatók segítségével [19], többféle, fröccsöntésben is alkalmazott alapanyagokból.

A tanulmány az alábbi fejezetekből áll: a 2. fejezet az alkalmazott anyagokat és módszereket írja le, ezt követően a 3. fejezetben ismertetjük a vizsgálataink

* főiskolai docens, Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar Gépészeti Intézet

** egyetemi docens, Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar Mérnöki Menedzsment és Ökonómiai Intézet

eredményeit és azok értékelését. A 4. fejezetben az összefoglalás található.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

A próbatetek két csoportra tagolódnak. Az első csoport a nyomtatható alapanyagok és a két legáltalánosabb műanyag 3D nyomtatási technológia (FDM és SLS) segítségével létrehozott termék vizsgálatát célozza. A második csoport próbatetei segítségével a meghatározó nyomtatási paraméterek változtatásának az elkészült termékre gyakorolt hatását vizsgáljuk, ehhez nyomtatási mérősorokat hozunk létre. A nyert adatok segítséget nyújtanak a modellek nyomtatása való optimalizálására, illetve nyomtatással legyártandó alkatrészek modellezésére, tervezésére és méretezésére során.

2.1. A kutatásunk során felhasznált berendezések

Sindoh 3DWOX 200

FDM technológiájú 3D nyomtató. Zárt munkaterének, és fűthető munkaasztalának köszönhetően PLA és ABS anyagok nyomtatására alkalmas (1. ábra). Használható munkatere 200x200x185 mm, az elérhető legkisebb rétegvastagság 0,05 mm. Alapanyagként sztenderd 1,75 mm átmérőjű filamentet használ, melyet az egyedi, kazetta alapú betöltő rendszer automatikusan adagol. A fájljelőkészítéshez a Sindoh saját slicere a 3DWOX Desktop alkalmazható, de az elterjedt freewave slicer programok, mint a Cura, vagy a Simplfy3D is kiválóan használhatóak.



1. ábra Sindoh 3DWOXDP200 nyomtató (saját forrás)

Intamsys Funmat HT

A Funmat HT egy kínai gyártmányú, FDM technológiájú 3D nyomtató. Felszereltségét tekintve ipari nyomtatónak tekinthető (2. ábra). Munkatere 260x260x260 mm, elérhető rétegvastagsága 0.05 mm. Cserélhető extrúdere lehetővé teszi magas hőmérsékletű, 450°C-ig fűthető extrúder alkalmazását. Fűthető zárt, szigetelt munkatere 90°C-os kamrahőmérsékletet tesz lehetővé. Üveg munkalapja 150°C-ig fűthető. Üveg

munkalapot használ, mely megfelelő előkészítése széleskörű alapanyag választékot tesz lehetővé. Felszereltségének köszönhetően az egyszerűbb alapanyagoktól, mint az ABS, a PLA vagy a PETG, a műszaki műanyagokig, mint a PA, vagy a PC egyaránt alkalmas berendezés.



2. ábra Intamsys Funmat HT nyomtató (saját forrás)

Makerbot Replicator+

A Replicator+ szintén FDM technológiájú nyomtató (3. ábra). Kihasználható munkatere 252x199x150 mm, minimális rétegvastagsága 0,1 mm. Flexibilis munkaasztala a modell kiváló tapadását és könnyű eltávolítását teszi lehetővé. Nyílt munkatere miatt kizárólag PLA alapanyag használatára képes. A modell előkészítése kizárólag a gyártó saját slicer programjával, a Makerbot Print-el lehetséges.



3. ábra Makerbot Replicator+ nyomtató (saját forrás)

2.1.1 Vizsgálat során felhasznált alapanyag műszaki jellemzői

PLA:

A poli-tejsav, vagy PLA a legáltalánosabb FDM 3D nyomtatásban alkalmazott alapanyag. Kristályos szerkezetű, polikondenzációval előállított termoplasztikus polimer, monomerje $(C_3H_4O_2)_n$. Viszonylag alacsony, 180-205°C megfolyási hőmérsékletének és előnyös nyomtatási tulajdonságainak köszönheti széleskörű elterjedését. Jellemzően jól tapad a munkaasztalhoz, nem hajlamos a felhajlásra, deformációra. A PLA alapanyag kiválóan színezhető, töltőanyagokkal kiválóan keverhető. Ennek köszönhetően elérhető szinte bármilyen színben, és a legkülönbözőbb speciális tulajdonságokkal, mint például áttetszőség, vagy fluoreszcencia. Általános célzatú alapanyagként tekinthető, kiválóan alkalmazható legtöbb esetben bármilyen nyomtatott modell elkészítésére.

ABS:

Az akrilnitril-butadién-sztirol, vagy röviden ABS egy amorf termoplasztikus kopolimer. Szerkezetét hosszú polibutadién láncok alkotják, melyeket rövidebb akrilnitril-sztirol kopolimer keresztkötések kapcsolnak össze. Három alkotó monomerje alapján kémiai képlete $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$. Az ABS 190-210°C közti hőmérsékleten ömlik meg, így a legtöbb nyomtató probléma mentesen képes vele dolgozni. ABS használatakor a sikeres nyomtatás érdekében ajánlott zárt légterű nyomtató és szükséges a 60°C hőmérsékletű, fűtött munkaasztal. Ezzel kiküszöbölhető, hogy a modell a kihűlés során kialakuló belső feszültségek következtében leváljon a munkaasztalról és tönkretegy a nyomtatást.

PC:

A polikarbonát az általános rendeltetésű PLA-hoz és ABS-hez képest igen jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, magasabb szakító szilárdságának és kis szakadási nyúlásának köszönhetően műszaki felhasználásra is alkalmas. Hátránya, hogy sikeres nyomtatásához megfelelően felszerelt nyomtató szükséges, ugyanis 220-240°C nyomtatási hőmérséklete mellett a deformáció és felválás elkerülése érdekében szükséges a 160°C-ra fűtött munkaasztal és a zárt, 90°C hőmérsékletű légtér.

PA:

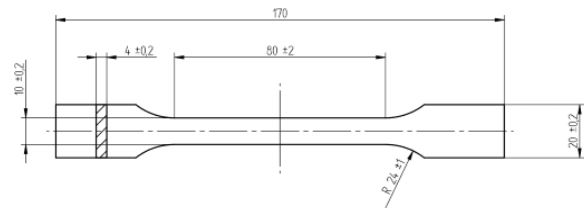
A poliamidok a műszaki polimerek, melyek monomerjei amid kötéssel kapcsolódnak egymáshoz. A polimerek molekulái lineáris polimerláncban karboxi-amidcsoportokat tartalmaznak, amelyek szabályos távolságban ismétlődnek. A poliamidoknak több változata is létezik, melyeket a monomerben a nitrogénatomok közt elhelyezkedő szénatomok száma különböztet meg egymástól [20]. A különböző variációkat a PA anyagjelzés utáni szám jelöli, vagyis a PA6 monomere 6 darab szénatomot tartalmaz, vagy a

PA6.6 esetén kétféle, 6 darab szénatomot tartalmazó monomer építi fel a polimert. Feldolgozásuk során adalékanyagokkal igen jól keverhetők, így kompozit anyagok gyártására rendkívül alkalmas, például gyakran alkalmaznak poliamid-üvegszál kompozitot, amely nagyban növeli az alapanyag mechanikai tulajdonságait [21][22].

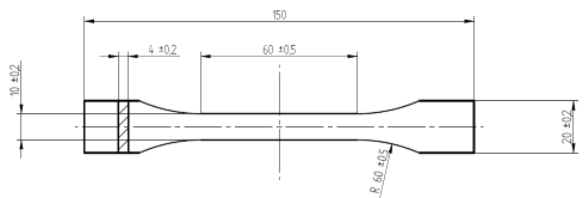
3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

3.1. Próbatetek kialakítása a vizsgálatokhoz

Az additív gyártó eljárásokat magába foglaló ISO/ASTM 52900 szabvány [23] jelenleg csupán az alapvető terminológiák meghatározását tartalmazza, főbb elemei az elkövetkező években kerülnek kiadásra. Ezért a műanyag szakító próbateteket a termék tekintetében legközelebb álló, illetve az eredmény összehasonlítását képző fröccsöntési technológiára hatályos, ISO 527 szabvány alapján készültek [12]. A próbatetek a szabványban foglalt ISO 527 type1A („piskóta” alak, hosszú kivitel; 4. ábra) és ISO 527 type1B („piskóta” alak, rövid kivitel; 5. ábra) próbatetek méreteit követik.



4. ábra ISO 527 type A szakító próbatet (saját forrás)



5. ábra ISO 527 type B szakító próbatet (saját forrás)

3.1.1. Próbatet mérősorok kialakítása a vizsgálatokhoz

A szakító próbatetes mérésekkel két féle mérőcsoportot hajtunk végre. Az első csoport a különféle alapanyagokkal készített próbateteket foglalja magába. Ezekből három különböző (x; y; z) elhelyezésben készítünk, minden orientációban 3-3 próbatetet. Ezek FDM nyomtatás esetén 100% anyagkitöltéssel, 0,15 mm rétegvastagsággal és 0,8 mm

héjvastagsággal készülnek. Az SLS mintákat általános, 0,125 mm rétegvastagsággal nyomtatuk. A 15 darab minta (5-5 mindhárom orientációban) EOS 396 nyomtatón készültek PA2200 alapanyagból, amely az EOS általános műanyag SLS nyomtató alapanyaga, tulajdonképpen egy a dalékolt PA12 keverék. A második csoportban az alapvető nyomtatási paraméterek változtatásának hatását vizsgáljuk a nyomtatott munkadarabra. Ehhez egyszerű kezelhetősége miatt minden próbatétel esetében PLA alapanyagot használunk. A vizsgált paraméterek a következők: Kitöltési hányad, Rétegvastagság, Héjvastagság. Rögzített nyomtatási paraméterek mellett egy-egy paraméter változtatásával állítottunk fel mérési sorokat. A nyomtatási paramétereket az 1. 2. és 3. táblázat rögzíti (saját forrás). Ezen próbatételek ugyanazon Sinterit 3DWOX DP200 nyomtatóval készülnek, egyidejűleg egy nyomtatásban három darab próbatétellel (1.,2.,3. táblázat).

1. táblázat Változó kitöltésű próbatétel sor

Infill (%)	Rétegvastagság	Héjvastagság
5	0,15(mm)	0,8(mm)
10	0,15(mm)	0,8(mm)
15	0,15(mm)	0,8(mm)
20	0,15(mm)	0,8(mm)
25	0,15(mm)	0,8(mm)
35	0,15(mm)	0,8(mm)
50	0,15(mm)	0,8(mm)
60	0,15(mm)	0,8(mm)
80	0,15(mm)	0,8(mm)
100	0,15(mm)	0,8(mm)

2. táblázat Változó rétegvastagságú próbatétel sor

Infill (%)	Rétegvastagság	Héjvastagság
20	0,05(mm)	0,8(mm)
20	0,1(mm)	0,8(mm)
20	0,15(mm)	0,8(mm)
20	0,20(mm)	0,8(mm)
20	0,25(mm)	0,8(mm)
20	0,30(mm)	0,8(mm)
20	0,35(mm)	0,8(mm)

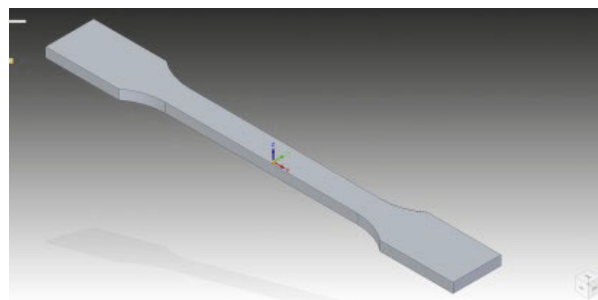
3. táblázat Változó héjvastagságú próbatétel sor

Infill (%)	Rétegvastagság	Héjvastagság
20	0,15 (mm)	0,4 (mm)
20	0,15 (mm)	0,8 (mm)
20	0,15 (mm)	0,12 (mm)
20	0,15 (mm)	0,16 (mm)
20	0,15 (mm)	0,20 (mm)

3.1.2. Nyomtatási folyamatok kialakítása a vizsgálatokhoz

A nyomtatási folyamat első lépéseként a próbatételek 3D modelljeit Solid Edge ST10 tervezőprogrammal

készítettük el. Mivel a tervező programok natív fájlformátumai a nyomtatási műveletekhez a legtöbb nyomtató esetében nem alkalmasak, ezért a modelleket STL (Standard Triangle Language) formátumba konvertáltuk (6. ábra). Az STL formátum az additív gyártási eljárások általánosan alkalmazott formátuma, amely a modell felületének koordinátapontjait tartalmazza konvertálástól függő sűrűségben, valamint a pontok által alkotott háromszögfelületek normálvektorait. A formátum a pontsűrűségtől függően adatvesztéssel, a felület kismértékű torzulásával jár, ám megfelelő pontsűrűségű fordítás esetén ez elhanyagolható.



6. ábra ISO 527 próbatétel modellje (saját forrás)

A kész próbatételek az egyszerű beazonosítás érdekében egyedi elnevezéseket kaptak. Az alapanyag próbatételek esetében ennek első tagja a nyomtató neve, második tagja az alkalmazott alapanyag, harmadik tagja pedig a nyomtatási orientáció, pl. 200 PLA X, vagyis a próbatétel a Sinterit DP200 nyomtatón készült, PLA alapanyagból és X irányú orientációval.

Paraméter mérősor próbatételeinek elnevezései:

PLA05%, PLA10%... PLA100% a kitöltési hányad mérősorának próbatételei paraméterértékkel.

Layer005, layer 010... layer 035 a rétegvastagság paramétersora megfelelő rétegvastagsággal jelölve.

Shell1, Shell2... Shell5 a héjvastagság próbatételei a megfelelő rétegszámmal jelölve (egy réteg 0,4mm).

Alapanyag mérések próbatételei:

Makerbot nyomtatón PLA alapanyagból X, Y és Z orientációval 3-3 próbatétel.

Sinterit DP200 nyomtatón PLA és ABS anyagból X és Y orientációval 3-3 próbatétel.

Funmat HT nyomtatón PC alapanyagból X és Y orientációval, PA6.6 alapanyagból X orientációban 3-3 próbatétel.

Sinterit LISA nyomtatón PA12 porból 3 darab 30°-ban elhelyezett próbatétel.

Az EOS nyomtatón készült poliamid alapanyagú X, Y és Z orientációjú próbatételek, 5-5 darab.

Paraméter mérősor próbatételei:

A változó kitöltöttségű mérősor minden próbatételéből 3-3 darab, összesen 30 darab próbatétel.

A változó rétegvastagságú mérősor minden próbatételéből 3-3 darab, összesen 21 darab próbatétel.

A változó héjvastagságú mérősor minden próbatestéből 3-3 darab, összesen 15 darab próbatest.

3.2. Alkalmazott berendezések és műszerek és vizsgálatok

Galdabini Quasar 100

A Galdabini Quasar 100 mechanikai anyagvizsgáló gép (7. ábra) a többféle igénybevételnek alávetett próbatestek mechanikai jellemzőinek meghatározására használható. Az általa használt berendezés asztali telepítésű, egyoszlopos gép, melynek terhelési tartománya 2,5kN-tól 100kN-ig terjed és roncsolásos statikus anyagvizsgálat végezhető el vele. A vizsgálatokat a Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar anyagvizsgálatai laborjában végeztük el.



7. ábra Galdabini Quasar 100 szakító gép (saját forrás)

A mérés során állandó, 5mm/sec keresztfej mozgást alkalmaztunk, mely a próbatest tönkremeneteléig zajlott. A szoftver a mérés során rögzíti a berendezés által kifejtett terhelés értékét a keresztfej elmozdulásával szemben. A mérést követően a mérési eredményeket Excel formátumú jegyzőkönyvekbe exportáltuk, melyek tartalmazzák a próbatest megadott méretadatait, a maximális kifejtett erőt, a szoftver által számított szakító szilárdságot, valamint a Terhelés (N) / Keresztfej löket (mm) diagramot. Az alapanyag mérősorok eredményeként kapott grafikonok segítségével információ kapható az egyes alapanyagok 3D nyomtatási technológiával készült mechanikai tulajdonságairól. A mérések segítségével számíthatók a mechanikai jellemzők, mint a szakító szilárdság, a szakadási nyúlás, a Young-modulus, illetve a grafikon alakja is információval szolgál a tönkremenetel lefutásáról. A szakító szilárdság értéke a mérőszoftver által kiszámított érték, míg szakadási nyúlás a Terhelés / Keresztfej löket diagramról leolvasható, ám figyelembe kell venni, hogy az esetleges nem tökéletes próbatest befogás miatt a

húzóerő nem azonnal épül fel, így a grafikon az X tengelyen némileg eltolódhat. A Young-modulus olyan anyagjellemző, amely egy anyag rugalmasságát adja meg. Fémek esetében ez a szakító diagram rugalmas szakaszának elemzésével határozható meg. Polimerek esetén ez a módszer nem teljesen pontos, de jó közelítést ad. Ennek oka az, hogy a polimereket alkotó hosszú láncú molekulák a feszültség hatására részlegesen rendeződnek, így a polimerek plasztikus és elasztikus viselkedést mutatnak. A polimerek elasztó-plasztikus viselkedésének feltárására a legalkalmasabb módszer a DMA, vagyis dinamikus mechanikai analízis, amely megadja az anyag veszteségi és tárolási modulusát a hőmérséklet viszonylatában, amelyek segítségével többek között az alapanyag különböző átalakulási tulajdonságára lehet következtetni. Jelen esetben a szakító diagram kezdeti szakasza szolgál a legtöbb információval. A rugalmassági modulus az anyag megnyúlásához szükséges feszültség arányaként a dódik.

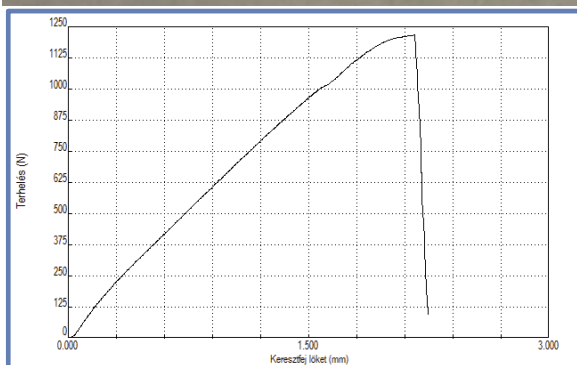
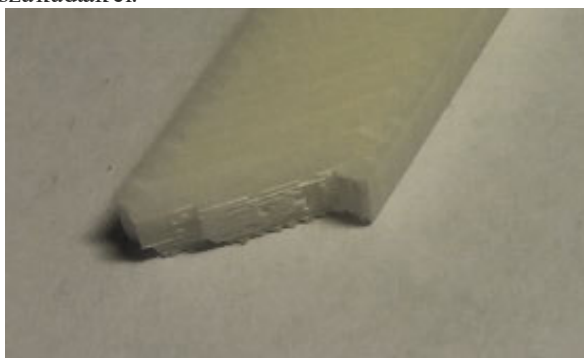
A 4. táblázatban az alapanyag mérések eredményeinek kiértékelése alapján kapott adatokat összesítettük.

4. táblázat Alapanyag vizsgálati próbatestek mérési eredményeinek összesítő táblázata

	Szakító szilárdság [MPa]		Szakadási nyúlás [mm]		Young-modulus [GPa]	
	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
Rep PLA X	31,97	+/- 2,21	3,13	+/- 0,50	1,211	+/- 0,086
Rep PLA Y	30,03	+/- 3,45	2,20	+/- 0,44	1,213	+/- 0,075
Rep PLA Z	33,61	+/- 2,15	2,40	+/- 0,26	1,357	+/- 0,050
200 PLA X	35,71	+/- 2,36	3,50	+/- 0,50	1,029	+/- 0,101
200 PLA Y	28,59	+/- 0,94	6,07	+/- 0,67	1,040	+/- 0,049
200 PLA Z	-	-	-	-	-	-
200 ABS X	33,17	+/- 0,38	5,93	+/- 0,89	0,743	+/- 0,018
200 ABS Y	31,32	+/- 3,77	4,90	+/- 0,55	0,812	+/- 0,024
200 ABS Z	-	-	-	-	-	-
fun PC X	43,84	+/- 2,46	4,70	+/- 0,17	1,095	+/- 0,010
fun PC Y	43,27	+/- 1,46	4,70	+/- 0,17	1,180	+/- 0,031
fun PC Z	-	-	-	-	-	-
fun PA6.6 X	37,36	+/- 4,40	261,33	+/- 18,04	0,282	+/- 0,007
fun PA6.6 Y	-	-	-	-	-	-
fun PA6.6 Z	-	-	-	-	-	-
lisa xy 30	18,03	+/- 2,05	3,91	+/- 0,93	0,334	+/- 0,002
eos x	38,49	+/- 1,19	27,80	+/- 4,31	1,111	+/- 0,006
eos y	37,14	+/- 1,69	25,60	+/- 2,19	1,132	+/- 0,037
eos z	36,20	+/- 1,28	12,70	+/- 3,83	1,026	+/- 0,007

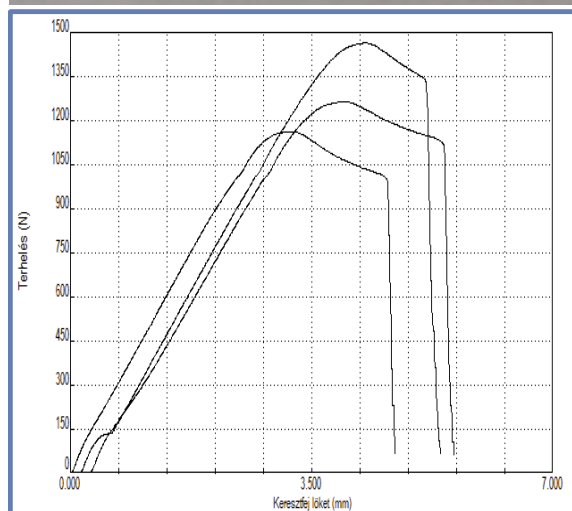
A PLA alapanyagok méréseinek kiértékelésére az összesítő táblázat (4. táblázat) adatait, a próbatestek mérései alapján az alapanyag 3D nyomtatott formájában 30-35 MPa szakítószilárdsággal rendelkeznek. A PLA fröccsöntött formájának átlagos szakító szilárdsága 47 MPa. Az érték 30% esésének nyilvánvaló oka a nyomtatott test inhomogenitásában keresendő. A szálakból álló szerkezet miatt bizonyos anyagszálak hamarabb szakadnak el a feszültség hatására, ezzel göcpontot képezve a próbatest tönkremenetelének. A

mért értékek igen erős eltéréseket mutatnak. Ennek egyik oka a két alkalmazott alapanyag (Makerbot filament; Sindoh filament) összetételének eltérése, másrészt a szakítóvizsgálati grafikonok vizsgálatával két szakadási típus lezajlása figyelhető meg (8. ábra). Az első esetben a próbatest szakítószilárdságát elérve a test teljes keresztmetszetében, pillanatszerűen eltörik, míg a második esetben a szakítószilárdság elérésével egy részleges tönkremenetel megy végbe, ám a anyagszálak egy része csak a további húzás hatására szakadnak el. Ezen esetben a szakadási nyúlás értéke lényegesen nagyobb. A szakadás során az összes próbatest esetében megfigyelhető, hogy a kitöltés keresztirányú száainak mentén terjedt a repedés. Míg egyik irányból a szálok teljes mértékben a rétegek közt váltak el, addig a rámerőleges irány száalai egyenesen, szinte vágás szerűen szakadtak el.



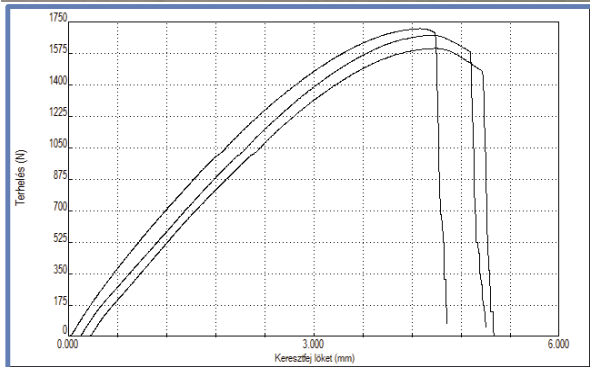
8. ábra PLA próbatest törete, szakító diagramja (saját forrás)

Az ABS minták adatait az összesítő táblázat (4. táblázat) ABS anyagra vonatkozó sorai, az eredmények alapján az 3D nyomtatott ABS szakító szilárdsága 30-33MPa, vagyis a PLA-val közel megegyező szilárdságú alapanyag. A tömör, fröccsöntött ABS 45MPa szakítószilárdságához képest ezen esetben is tapasztalható a szálak struktúrából következő 25%-os csökkenés. Az ABS törése a mérések minden esetében a PLA-nál megfigyelhető, elnyújtott módon zajlott. (9. ábra), töreti képén azonban a törés iránya többször irányt vált, a törésvonal nem folytonos.



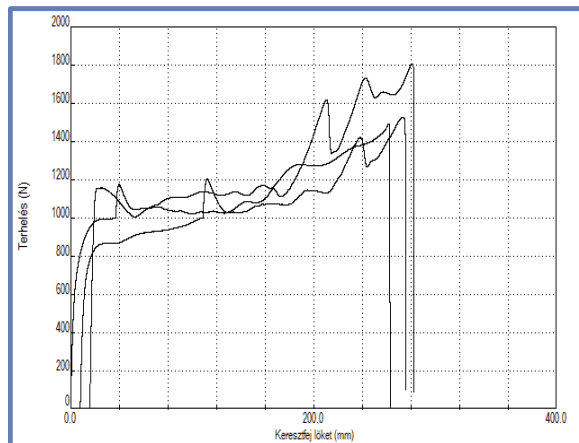
9. ábra ABS próbatest törete, szakító diagramja (saját forrás)

A PC alapanyag méréseinek összesített eredményeit az összesítő táblázat (4. táblázat) fun_PC_X és fun_PC_Y sorai, a mérési eredmények alapján a nyomtatott PC alapanyag szakítószilárdsága 43-44 MPa, vagyis a technológiából a dódó 33%-os esés ebben az esetben is tapasztalható. A vizsgálati görbék alapján (10. ábra) a törés a szakítószilárdság elérését követően rövid lefutással, hirtelen megtörténik. A próbatest tönkremenetele során a héjban és a kitöltésben nem egyenletesen fellépő feszültség hatására a próbadarab a két zóna határán hosszanti irányban felhasadt. A törés vonala fogazott, többszörösen irányt vált, de folyamatosan a kitöltés 45°-os iránya mentén halad.



10. ábra PC próbatest törete, szakító diagramja (saját forrás)

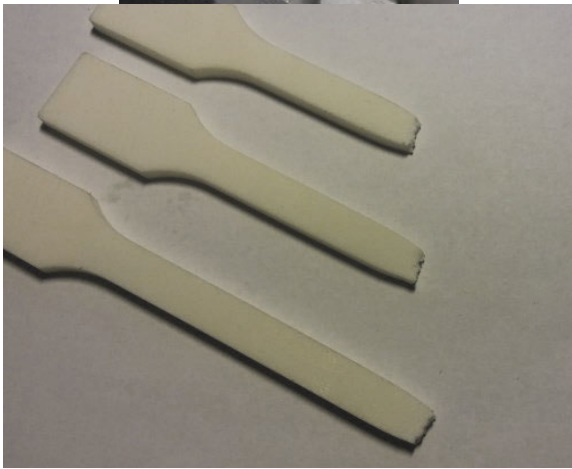
A poliamid 6.6 próbatestes mérésének eredményét az összesítő táblázat (4. táblázat) fun_pa6.6_X sora, A vizsgálat során az anyag rendkívüli mértékű megnyúlást mutatott. Egy kezdeti, rugalmasnak tekinthető alakváltozású szakaszt követően a próbatesten megjelent a törésre utaló elvékonyodás, befűződés. Azonban a törés nem következett be, ellenben a keskeny szakasz a próbatest hosszában növekedni kezdett, végül a teljes próbatest elvékonyodott. A próbatesten megfigyelhető, ahogy a keresztirányú anyagszálak szinte teljes mértékben kiegyenesedtek. A folyamat során a szakító görbe folyamatosan növekedése figyelhető meg, melyen véletlenszerű feszültségcsúcsok helyezkednek el, melyek a belső szerkezet fokozatos átalakulására, elmozdulására, illetve a nagyobb terhelésnek kitett szálakban a polimer láncok megnyúlhatnak és orientálódnak, amely az anyag felkeményedését okozza. A mérés végére a próbatest teljes hosszában végbement a láncok hosszirányú orientálódása, az anyag a kezdeti enyhe sárgás, vajszerű megjelenéséhez képest lényegesen kivilágosodott. Ezt a grafikonon a szakadást megelőző utolsó feszültségcsúcs jelzi. A próbatesten mért szakító szilárdság érték 37 MPa, azonban a próbatest deformációja már 25-28 MPa feszültség hatására megkezdődött.



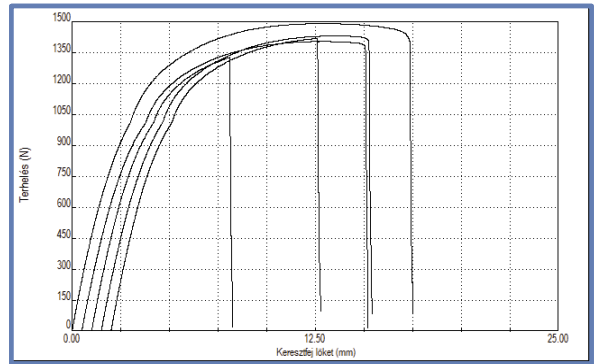
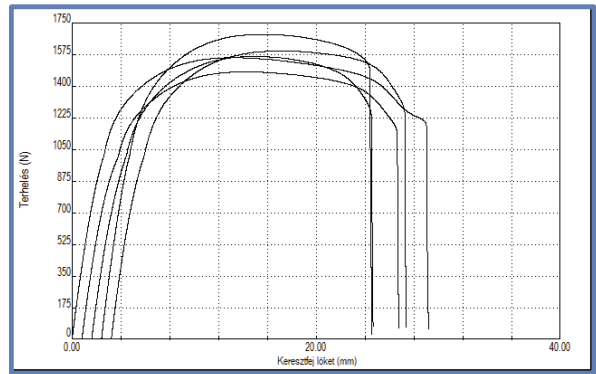
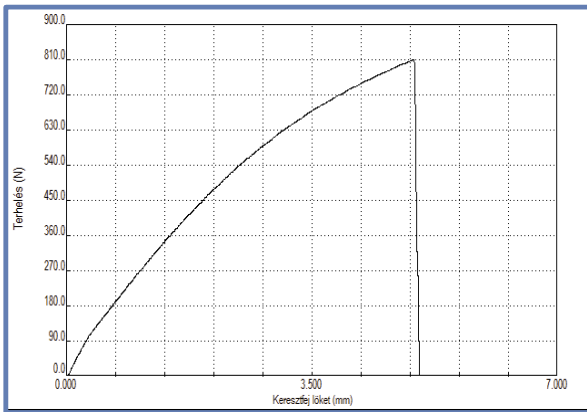
11. ábra PA6.6 próbatest törete, szakító diagramja (saját forrás)

A PA12 poliamid por alapanyagokkal végzett mérések eredményeit az összesítő táblázat (4. táblázat). A Sinterit LISA nyomtatóval készült próbatestek szakító szilárdsága mindössze 18 MPa, míg az EOS nyomtatón készültké 35-37 MPa. A kettő közötti nagymértékű eltérésnek több oka is lehet, többek között az alapanyag összetétele, az alapanyag szemcsemérete, a szinterezéshez alkalmazott lézerteljesítmény, az anyag hőmérséklete szinterezés közben, a réteg vastagság, a nyomtatás során alkalmazott gázatmoszféra.





12. ábra Eltört Sinterit PA12 és EOS PA12 próbatest és törete (saját forrás)



13. ábra Sinterit PA12, EOS PA12 (X, Y, Z orientáció) szakító diagramja

3.3. Paraméter mérések eredményei

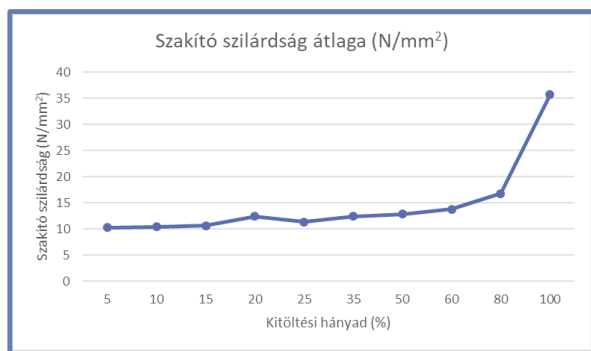
A gyártási paraméter befolyásoló hatásának vizsgálata a legcélszerűbb, összehasonlításra alkalmas mérőszám a szakítószilárdság. Mivel minden próbatest esetében ugyanazon nyomtatót és ugyanazon gyártó PLA a anyagát használtuk a gépi, vagy anyagtulajdonságbeli fő zavaró hatásokat kizártuk a mérésekből.

3.3.1 Kitöltési mérések eredményei

A kitöltési mérősor szakító szilárdság adatait az 5. táblázat és 14. ábrán látható grafikonon összesíti. Az anyag kitöltési hányad változása a mért adatok alapján 80%-os kitöltöttség alatt minimális mértékben befolyásolja a test szakítószilárdságát. A kitöltési hányad növelése ugyan kis mértékben növelte a szakítószilárdságot, ám az eredmények alapján jól látható, hogy nem az infill régió az elsődleges teherviselő szerkezeti elem.

5. táblázat Kitöltési hányad mérősor mérési eredményeinek összesítése

Kitöltési hányad (%)	Szakító szilárdság átlaga (N/mm ²)	Szórás
5	10,29	± 0,13
10	10,48	± 0,15
15	10,68	± 0,53
20	12,44	± 1,73
25	11,40	± 0,87
35	12,47	± 1,08
50	12,86	± 0,61
60	13,81	± 0,91
80	16,82	± 1,48
100	35,70	± 2,36



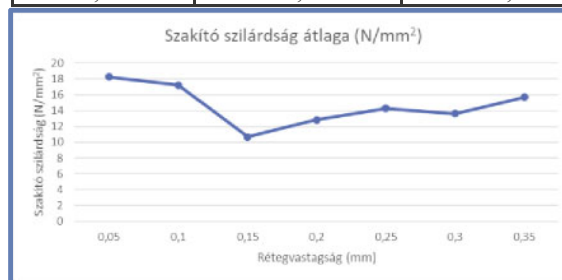
14. ábra Szakítószilárdság változása a kitöltési hányad függvényében

3.3.2 Rétegvastagság mérések eredményei

A rétegvastagság mérősor szakító szilárdság adatait a 6. táblázat és 15. ábra szemlélteti. A rétegek vastagságának mérése során, érdekes módon az eredmények nem mutatnak különösebb törvényszerűséget vagy trendet a rétegvastagság és a szakító szilárdság között. Ennek oka lehet, hogy a rétegek a terhelés irányára párhuzamosak, ám sajnos a Z irányú, vagyis „álló” próbatetek nyomtatása nem volt sikeres. Amennyiben a terhelés irányára merőleges rétegfelépítésű próbatetek sikeresen elkészülnek, a mérés információval szolgálhatna a rétegvastagság és a rétegek a dhéziójának viszonyáról.

6. táblázat Rétegvastagság mérősor mérési eredményeinek összesítése

Rétegvastagság (mm)	Szakító szilárdság átlaga (N/mm ²)	Szórás
0,05	18,28	± 1,20
0,1	17,22	± 0,97
0,15	10,68	± 0,53
0,2	12,84	± 0,65
0,25	14,29	± 0,43
0,3	13,6	± 0,56
0,35	15,68	± 0,27



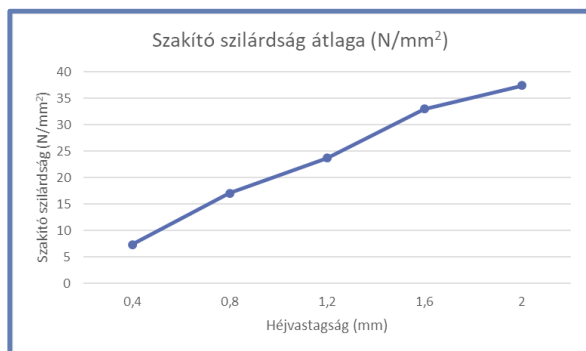
15. ábra Szakítószilárdság változása a rétegvastagság függvényében

3.3.3 Héjvastagság mérések eredményei

A héjvastagság mérősor szakító szilárdság adatait a 7. táblázat és 16. ábra szemlélteti. A mért értékek alapján a héjvastagság változtatása okoz tényleges változást a nyomtatott test szilárdságára. A héj vastagságának növelésével a test szakítószilárdsága egyenes arányban növekedik. Ennek oka a nyomtatott test felépítésében keresendő. A test terhelt keresztmetszetében húzási irányra párhuzamos, a shell-t felépítő szálak, illetve az infill átlósan elhelyezkedő száalai találhatóak. A shell növelésével a keresztmetszet felülete is nagyban növekedik. Az utolsó, 2mm falvastagságú próbadarabok esetében ez a 100%-os kitöltöttségű próbatestet eredményez, amely csupán nyomtatási irányait tekintve tér el a 100% kitöltöttségű próbatesttől, valamint annak mért értékétől való eltérése a mérések szórásán belül esik.

7. táblázat Héjvastagság mérősor mérési eredményei

Héjvastagság (mm)	Szakító szilárdság átlaga (N/mm ²)	Szórás
0,4	7,38	± 0,25
0,8	17,10	± 0,65
1,2	23,75	± 1,01
1,6	33,04	± 0,68
2	37,45	± 2,63



16. ábra Szakítószilárdság változása a rétegvastagság függvényében

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A szerkezeti anyagok választékában a polimerek és kompozitjaik alkalmazása, azok kiváló mechanikai, fizikai és kémiai tulajdonságai miatt, igen elterjedt. A kis sűrűség és az ahhoz tartozó viszonylag nagy szilárdság, a csillapító és szigetelőképeség, a vegyszer és korrózióállóság, a tervezhető anizotrópia stb. napjaink legnépszerűbb anyagává tették a szintetikus polimereket. Alkalmazásukkal nemcsak energiát takaríthatunk meg, hanem a fenntartható fejlődés zálog is ez az anyagcsalád. A mai polimertechnikai kutatások arra irányulnak, hogy olyan anyagokat fejlesszünk, amelyek környezetbarátabbak, csökkentik az energia felhasználást, könnyebbé és komfortosabbá teszik a hétköznapi életünket.

Munkánk során 3D nyomtatással készült műanyag alkatrészek mechanikai tulajdonságainak vizsgálatát végeztük el, amellyel szerettünk volna bővebb információt kapni a technológia alkalmazásának lehetőségeiről és korlátairól. Első lépésként fröccsöntött műanyag termékek vizsgálatára alkalmazott szabványos próbatesteket készítünk különböző 3D nyomtatási technológiákkal, különböző 3D nyomtatók segítségével, többféle, fröccsöntésben is alkalmazott alapanyagokból. A próbatestekkel két eredménycsoportot kívántunk elérni. Elsőként az FDM és SLS technológiák alapanyagainak mechanikai tulajdonságát vizsgáltuk. A másik eredménycsoport az FDM nyomtatással készült alkatrészek gyártási paramétereinek hatását hivatott feltárni. Ehhez a fő gyártási paraméterek (kitöltési hányad, rétegvastagság, héjvastagság) változtatásával mérősorozatokat hoztunk létre. A mérések során az összes FDM nyomtatással készült alanyag esetében megfigyelhető volt a szakító szilárdság értékének 25-35%-os esése a fröccsöntött alanyag szilárdságához képest. Ez beláthatóan az FDM technológia anyagszálakból történő modellfelépítésének következménye. Az elkészült testek szerkezeti inhomogének, ami a próbatestek töréseiben megjelenő

száírányú repedési orientációkon is jól megfigyelhető. Az SLS próbatestek esetében az alapanyag fröccsöntött formájának szilárdságához képest a próbatestek lényegesen gyengébbek voltak. A paraméterek változtatásának hatását a második próbatest csoport vizsgálta. Ezek eredményei alapján meglepő eredményt hozott, hogy a test kitöltési hányada szinte alig befolyásolja az alkatrész szilárdságát, illetve a három vizsgált paramétercsoport közül egyedül a héjvastagság növekedése segíti elő a szakító szilárdság növekedését. Az eredmények fényében elmondható, hogy a nyomtatott alkatrészek esetében a testet érő terhelés eloszlása nem egyenletes, az elsődleges terhelő elem a héjszerkezet, míg a kitöltés csupán másodlagos terhelőként van jelen. A kapott eredmények alapján a vizsgált 3D nyomtatási technológiák jelenleg nem képesek a fröccsöntéssel megegyező szilárdságú termék előállítására, olyan technológiai sajátosságok, mint a tervezett alkatrész nagyfokú formaszabadsága egyéb alkalmazási lehetőségeket nyit meg.

Ennek megfelelően a jövőben is folytatjuk az elkezdett munkát, amely az eddigi kutatási eredményeink gyakorlati alkalmazási lehetőségeit lesz hivatott feltárni.

5. IRODALOM

- [1] NAIJU C.D., ADITHAN M., RADHAKRISHNAN P.: *Investigation on Surface Roughness and Dimensional Accuracy of Direct Metal Laser Sintered (DMLS) Tooling Inserts for Injection Molding*, Proceedings of the International Conference on Design and Advances in Mechanical Engineering (ICDAAME 2011), SKP Engineering College, Tiruvannamalai, TN., India. 16-17 December, (2011), pp. 239-244.
- [2] SWOLFS Y., GORBATIKH L., VERPOEST I.: Fibre hybridisation in polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 67, (2014), pp. 181–200, doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.08.027
- [3] FRIEDRICH K., FAKIROV S., ZHANG Z.: *Polymer Composites*, Springer US, Boston, 2005
- [4] CZVIKOVSKY T., NAGY P., GAÁL J.: *A polimertechnika alapjai*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2006
- [5] DEOPURA B. L., ALAGIRUSAMY R., JOSHI M., GUPTA B.: *Polyesters and polyamides*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2008, eBook ISBN: 9781845694609
- [6] JANCAR J., DOUGLAS J. F., STARR F. W., KUMAR S. K., CASSAGNAU P., LESSER A. J., STERNSTEIN S. S., BUEHLER M. J.: Current issues in research on structure-property relationships in polymer nanocomposites, *Polymer*, Vol. 51, No. 15, (2010), pp. 3321–3343, doi.org/10.1016/j.polymer.2010.04.074

- [7] TREWIN E.: *The advanced composites industry - Global markets, technology trends and applications*, Materials Technology Publications, Watford, UK, 2003
- [8] BAEK GY. J., SHING. Y., LEE K. Y., SHIM D. S.: Mechanical Properties of Tool Steels with High Wear Resistance via Directed Energy Deposition, *Metals*, Vol. 9, No. 3, (2019), doi:10.3390/met9030282 2019
- [9] ROSATO D. V., ROSATOT D. V.: *Reinforced Plastics Handbook*: Third edition, Elsevier, Oxford, 2004, ISBN 1 8561 74506
- [10] GEBHART A., HÖTTER J. S.: *Additive Manufacturing, 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*, Hanser Publications, Munich, 2016
- [11] RAFIEE M. A., RAFIEE J., WANG Z., SONG H., YU Z. Z., KORATKAR N.: Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content, *ACS Nano*, Vol. 3, No. 12, (2009), pp. 3884–3890, doi.org/10.1021/mn9010472
- [12] ISO 527-1:2019 ISO 527-1:2019 Plastics — Determination of tensile properties
- [13] HASSAN A., SALLEH N. M., YAHYA R., SHEIKH M. R. K.: Fiber length, thermal, mechanical, and dynamic mechanical properties of injection-molded glassfiber/polyamide 6,6: plasticization effect, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 30, No. 6, (2011), pp.488–498, doi:10.1177/0731684410397898
- [14] BERÉNYI L., SOLTÉSZ L.: Evaluation of Product Development Success: A Student Perspective, *Administrative Sciences*, Vol. 12, No. 2. (2022), pp. doi.org/10.3390/admsci12020049
- [15] SOLTÉSZ L., BERÉNYI L., KAMONDI L.: Termékfejlesztési folyamatok fejlődési irányai, *Munkatársi Tudományos Közlemények: A Miskolci Egyetem Közleménye*, Vol. 11, No. 4, (2021), pp. 3–14, doi.org/10.35925/j.multi.2021.4.1
- [16] FORSDYKE K. L., STARR T. F.: *Thermoset resins-Market Report*, Rapra Technology Limited Shawbury, Shropshire, 2002, ISBN 1-85957-355-X
- [17] FU S., LAUKE B.: Effects of fiber length and fiber orientation distribution on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers, *Composites Science and Technology*, Vol. 56, No. 10, (1996), pp. 1179–1190, doi.org/10.1016/S0266-3538(96)00072-3
- [18] MASUBUCHI Y., TERADAM., YAMANAKA A., YAMAMOTO T., ISHIKAWA T.: Distribution function of fiber length in thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*, Vol. 134, (2016), pp. 43–48, doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.08.007
- [19] REDWOOD B., SCHÖFFER F., GARRET B.: *The 3D printing Handbook*, 3D Hubs, Amsterdam, 2017
- [20] BUNSELL A. R., HARRIS B.: Hybrid carbon and glass fibre composites. *Composites*, Vol. 5, No. 4, (1974), pp. 157–164, doi.org/10.1016/0010-4361(74)90107-4
- [21] MOUHMI B., IMAD A., BENSEDDIQ N., BENMEDAKHÈNE S., MAAZOUZ A.: A study of the mechanical behaviour of a glass fibre reinforced polyamide 6,6: Experimental investigation. *Polymer Testing*, Vol. 25, No. 4, (2006) pp. 544–552, doi.org/10.1016/j.polymeresting.2006.03.008
- [22] WU S.-H., WANG F.-Y., MA C.-C. M., CHANG W.-C., KUO C.-T., KUAN H.-C., CHEN W.J.: Mechanical, thermal and morphological properties of glass fiber and carbon fiber reinforced polyamide-6 and polyamide-6/clay nanocomposites. *Materials Letters*, Vol. 49, No. 6, (2001), pp. 327–333, doi.org/10.1016/S0167-577X(00)00394-3
- [23] ISO/ASTM52900-2015 Additive manufacturing – General principles

TÖMEG, KÖLTSÉG ÉS KÖRNYEZETI HATÁS MINIMÁLÁSA HEGESZTETT ACÉLSZERKEZETEKNEÉL

MINIMISING THE WEIGHT, COST AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF WELDED STEEL STRUCTURES

Dr. Jármái Károly*

ABSTRACT

The article describes how to calculate the environmental impact of steel structures and how different welding technologies cause environmental impacts through the formation of gases during the process. The weight or direct cost of a steel structure can be minimised by optimising the structure.

KIVONAT

Az optimalás segítségével vizsgáljuk a tervezés és a gyártástechnológia, valamint a gazdaságosság kapcsolatát. Ez a három elem együttesen segít kiválasztani a legjobb lehetőséget. A szerkezeti megközelítés csak azokat a költségelemeket veszi figyelembe, amelyek közvetlenül kapcsolódnak a szerkezeti méretekhez. Egy valós szerkezet költségfüggvénye tartalmazhat anyagköltségeket, összeszerelési költségeket és egyéb gyártási költségeket, például hegesztési, felület-előkészítési, festési, vágási, élkösörülés és geometria-alakítási költségeket.

A tömegcsökkenés önmagában is csökkenti a globális környezeti hatásokat, mint a Globális felmelegedési potenciál (GWP), Ozonlebontási potenciál (ODP), a Savasodási potenciál (AP), az Eutrofizációs potenciál (EP), a Fotokémiai ózonképződési potenciál (POCP), valamint az Abiotikus kimerülési potenciál. A hegesztés vonatkozásában a különböző hegesztőhuzalok felhasználásával történő gyártás során adódó gázkibocsátások különbözők. Például fémmagos huzal, valamint az önvédő porbeles huzal esetén eltérő a szén-monoxid (CO), a szén-dioxid (CO₂) és a kén-dioxid (SO₂) gázok mennyisége, így környezeti hatása is.

1. BEVEZETÉS

Ez a tanulmány a különböző hegesztési technológiák költségszámításait hasonlítja össze környezeti és a szerkezeti megközelítéssel. Ezek a költségek a szerkezet optimalás célfüggvényei. Az optimalás segítségével vizsgáljuk a tervezés és a gyártástechnológia, valamint a

gazdaságosság közötti kapcsolatot. Ez a három tényező együttesen segít megtalálni a legjobb megoldást.

A költséghatékonyság kritikus fontosságú. A szerkezeti megközelítés költségbecslései az anyagköltségeken alapulnak, és a szerkezet méreteit, méreteit vagy alakját közvetlenül befolyásoló gyártási költségekre korlátozódnak. Az anyag-, összeszerelési, hegesztési, felület-előkészítési, festési, vágási, élcsiszolási és a lakítási költségek mind benne vannak a költségfüggvényben, amely a gyártási sorrendnek megfelelően épül fel.

Ez a módszer figyelmen kívül hagyja az egyéb költségeket, például az amortizációt, a beruházást, a szállítást és a karbantartást. A tervezés és az ellenőrzés költségei megbecsülhetők, de általában arányosak a szerkezet súlyával. A költség- és gyártási időadatok a világ számos vállalatától származnak. Ha ugyanazt a konstrukciót különböző országokban összehasonlítjuk, figyelembe kell venni a munkaerőköltségek különbségeit. Ha a gyártástechnológia azonos, akkor az befolyásolja leginkább a szerkezetet. A környezetvédelmi szemléletben figyelembe kell venni az olyan környezeti kérdéseket, mint a globális felmelegedési potenciál, az ózonlebontási potenciál, a savasodási potenciál, az eutrofizációs potenciál, a fotokémiai ózonképződési potenciál és az abiotikus kimerülési potenciál.

2. A SZERKEZETI MEGKÖZELÍTÉS KÖLTSÉGELEMEI

Ebben a megközelítésben csak a szerkezeti méretekkel közvetlenül arányos költségelemeket veszik figyelembe. Az anyagköltségek, az összeszerelési költségek és az egyéb gyártási költségek, mint például a hegesztés, a felület előkészítése, a festés, a vágás, az élcsiszolás és a geometria kialakítása mind beletartozhatnak egy valós szerkezet költségfüggvényébe. Néhány kutató, aki ezen a területen dolgozott, többek között Klansek és Kravanja [1], Farineau és társai [2], valamint Farkas és Jármái [3, 4, 5]. Mela és Heinisuo [6], valamint Kovács és Farkas [7] a na gyszilárdságú a célok esetében.

* egyetemi tanár, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

2.1 Az anyagköltség

$$K_M = k_M \rho V, \quad (1)$$

Az acél fajlagos anyagköltsége $k_M=1,0-1,5$ \$/kg lehet a vastagságtól és a minőségtől függően, míg az alumínium fajlagos anyagköltsége $k_M=3,2-4,2$ \$/kg lehet [8]. Az anyagköltséget K_M [kg], az anyagköltségtényezőt k_M [\$/kg], a szerkezeti térfogatot pedig V [mm³] jelöli. Az acél sűrűsége $7,85 \times 10^{-6}$ kg/mm³, míg az alumínium sűrűsége $2,7 \times 10^{-6}$ kg/mm³. Több anyag felhasználása esetén az (1) egyenletben egyszerre több anyagköltségtényezőt is lehet használni.

2.2 A gyártási költség általában

A gyártási költségeket a gyártási idő és a fajlagos gyártási költségek határozzák meg, amelyek országonként eltérőek. A gyártási időt azonos technológia alkalmazása esetén a zonosnak tekintjük.

$$K_F = k_F \sum_i T_i \quad (2)$$

ahol k_F [\$] a gyártási költséget, k_F [\$/perc] a gyártási költségtényezőt, T_i [perc] pedig a gyártási időt jelenti. A k_F értékét egy adott gyártó esetében állandónak feltételezzük. Ha nem, akkor az egyenletben egyszerre különböző gyártási költségtényezőket lehet használni (2).

2.3 A hegesztéshez szükséges gyártási idők

A hegesztés teljes költségének kiszámításakor számos tényezőt kell figyelembe venni. A legnyilvánvalóbb tényező a fogyóanyagok (elektróda és védőgáz vagy védőfolyadék) költsége. A hegesztési folyamathoz kapcsolódó kevésbé nyilvánvaló (és néha figyelmen kívül hagyott) költségek a munkaerő- és a rezsiköltségek. Nem olyan egyszerű, mint amilyennek látszik, hogy a rendelkezésre álló berendezésekhez a legköltséghatékonyabb hegesztési eljárást (FCAW, GMAW, SMAW stb.) és hegesztőelektródát (huzal vagy pálcá) válasszuk ki.

Ha a hegesztőgép maximális kimeneti áramfórási 450 amperes, 60 százalékos munkaszünetű gépek, az elektróda kiválasztására adott válasz nem biztos, hogy olyan egyszerű, mint "használjuk a lehető legszélesebb huzalát méretet a legjobb lera kódási sebesség eléréséhez". A mi megközelítésünkben a hegesztési idő lesz az elsődleges számítási alap. Az előkészítés, az összeszerelés, a hegesztés, a hegesztési idő, az elektródacsere, a salakmentesítés és a forgácsolás a hegesztéssel járó fő idők.

2.4 Az előkészítési, összeszerelési és hegesztési idők számítása

Az alábbi közelítő képlet segítségével becsülhetjük meg az előkészítés, az összeszerelés és a hegesztés idejét: [9]. C_1 a hegesztési technológia paramétere (általában 1), θ_{dw} a nehézségi tényező, és az összeszerelendő szerkezeti elemek száma. A nehézségi tényező értékét a szerkezet összetettsége (sík vagy térbeli), valamint a tagok típusa (lapos, csőszerű) határozza meg. A javasolt értéktartomány 1-4 [10].

Az előkészítés, az összeszerelés és a hegesztés idejének becsüléséhez használja a következő közelítő képletet: [9].

$$T_{w1} = C_1 \theta_{dw} \sqrt{k \rho V}, \quad (3)$$

2.5 A tényleges hegesztési idő becslése

A tényleges hegesztési idő kiszámításához az alábbi képlet használható:

$$T_{w2} = \sum_i C_{2i} a_{wi}^2 L_{wi}, \quad (4)$$

ahol a_{wi} a varratméret, L_{wi} a hegesztés hossza különböző hegesztési módszerek esetén, C_{2i} konstans. A C_{2i} nemcsak a hegesztési technológia változásait tartalmazza, hanem a pozíciós (függőleges, felülről történő) és a tipikus, lefelé irányuló kézi helyzetben történő hegesztés közötti időbeli eltéréseket is [11, 12, 13]. Az interneten különböző dokumentumok találhatóak, amelyek felhasználhatók a hegesztési sebesség kiszámításához [14, 15]. Az 1. táblázat a hosszirányú hézagoló hegesztések hegesztési idejét mutatja SMAW, GMAW-CO₂ és FCAW technológiáknál.

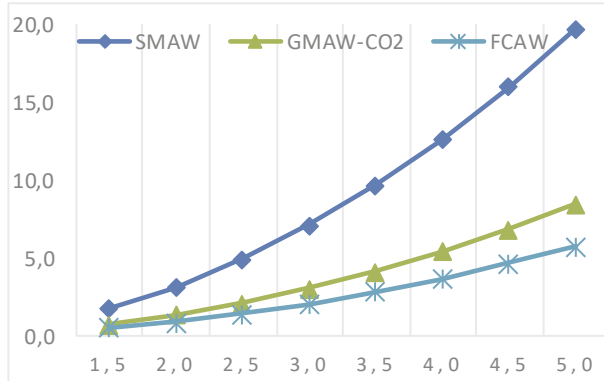
1. táblázat. T_{w2} (min/m) hegesztési idők hosszirányú hézagoló hegesztésekhez lefelé irányuló kézi helyzetben a varratméret a_w (mm) függvényében.

Hegesztési eljárás	a_w [mm]	$10^3 T_{w2}$
SMAW	1-6	$0.7889 a_w^2$
GMAW-CO ₂	1-6	$0.3394 a_w^2$
FCAW	1-6	$0.2302 a_w^2$

A technológiák rövidítései a következők: Az SMAW a bevontelektródás kézi ívhegesztést jelenti, míg a GMAW-CO₂ a CO₂-vel történő ívhegesztést, az FCAW a porbeles ívhegesztést. A hegesztési sebességekről gyűjtött adatok alapján a TableCurve 2D szoftver segítségével közelíteni tudtuk a hegesztési időt a hegesztési technológia és a hegesztett lemez vastagságának függvényében. Az új technológiák a lézeres és a TIG/GTAW hegesztés, ahogyan az 1. ábrán látható. Mint megfigyelhető, a leglassabb hegesztési módszer az SMAW (Shielded Metal Arc Welding), míg a leggyorsabb a lézerhegesztés (feltételezve, hogy a beruházási költségeket figyelmen kívül hagyjuk).

2.6 A további gyártási műveletek idejének kiszámítása

Az elektróda cseréje, a salakmentesítés és a forgácsolás néhány a figyelembe veendő további gyártási műveletek közül. Egy durva becslés, hogy mennyi időt vesz igénybe, a következő:



1. ábra. T_{w2} (perc/m) hegesztési idő hosszirányú hézagoló hegesztéseknél lefelé irányuló kézi helyzetben a varratméret a_w (mm) függvényében.

$$T_{w3} = 0.3 \sum C_{2i} a_{wi}^2 L_{wi} \quad (5)$$

Ez arányos kapcsolatban áll T_{w2} -vel. A teljes mennyiségnek körülbelül 30%-át teszi ki. A két időkomponens a következő: (1. ábra):

$$T_{w2} + T_{w3} = 1.3 \sum C_{2i} a_{wi}^n L_{wi} \quad (6)$$

Minden egyes technológia esetében az 1/2 V, V, K és X hegesztések hegesztési ideje változik

2.7 Termikus és vízsugaras vágás

Az oxigéngáz-, a plazma-, a lézer- és a vízsugaras abráziós vágás a négy legnépszerűbb érintésmentes fémvágási technika. Az első három vágási módszer termikus, míg a vízsugaras módszer koptató erózióval vág. Ezt a négy technikát gyakran használják sík lemezek és lemezek anyagának precíz külső és belső vágásainak létrehozására [16, 17, 18, 19].

2.8. Lemezvágási és élciszolási idők

Eredetileg a termikus vágás oxigéngázzal, főként acetiléngázzal volt az egyetlen lehetőség. Az oxigénüzemű fáklya előmelegítő lángot tartalmaz, amely a vasat vagy szénacélt "gyújtási hőmérsékletre" melegíti, ami nagyjából 480 Celsius-fok. Ezt követően az acél tiszta oxigénáramnak van kitéve, amely gyors égési reakciót vált ki az acél és az oxigén között. Az olvadt anyagot, az úgynevezett salakot a vágó oxigénáram átfújja a fémen, ami viszonylag sima és egyenes vágást eredményez. A vágás és élciszolás többféle technológiával is végezhető, többek között acetilénnel,

stabilizált gázkeverékkel és propánnal, normál és nagy sebességgel. A következő paramétereket adta meg Farkas, Jármai [5]: A vastagságot milliméterben, míg a vágási hosszt milliméterben mérik.

$$T_{CP} = \sum_i C_{CPi} t_i^n L_{Ci} \quad (7)$$

A görbeillesztési számítások megadják az n értékét. A termikus folyamatoknak és az oxigéngázos folyamatoknak egyaránt két hátránya van. A vágás közelében lévő "hőhatású zónákban" a fém szerkezetét először a hő változtatja meg. Egyes metallurgiai jellemzők a vágás szélénél romolhatnak, ami előkezelést vagy vágást tesz szükségessé. Másodszor, a lézervágás kivételével a tűrések kevésbé pontosak lehetnek, mint a megmunkált vágásnál.

A fémek és néhány nem fémes a anyag figyelemreméltó pontossággal vágathatók a lézervágással, amely viszonylag új technika. A lézersugár átmérője 0,2 mm, teljesítménye pedig 1-2 kW. A lézervágás során a fúvókában lévő kis lyukon keresztül nagy sűrűségű fénysugár érkezik. Amikor ez a sugár a munkadarab felületével találkozik, a munkadarab anyaga a zonnal „széletelődik”. A szén- és rozsdamentes acélok ideális anyagok a lézerrel történő megmunkáláshoz. Az olyan fémeket, mint a alumínium és a rézötvözetek, a lézervágás visszaverésére, valamint a hő elnyelésére és átadására való hajlamuk miatt nehezebb lézerrel vágni.

Acél vízsugaras vágása. A vízsugaras vágógép rendkívül nagy nyomású vízsugárral vagy víz és csiszolóanyag keverékével az anyagok széles skáláját képes vágni [20].

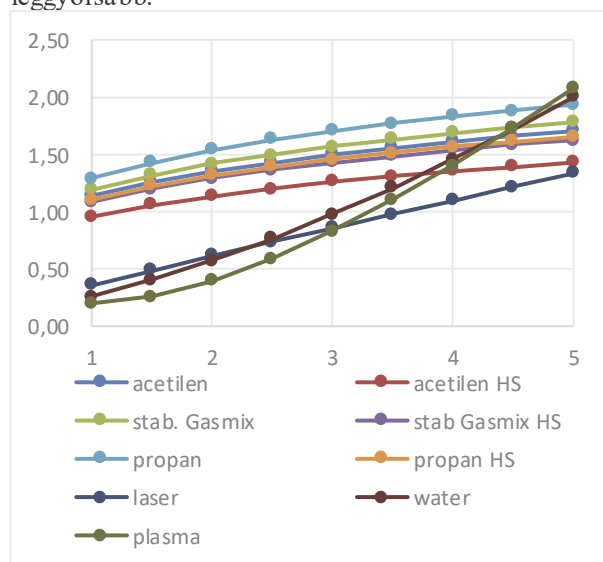
2. táblázat. Lemezvágási idő, T_{CP} (perc/mm) hosszirányú hézagolt hegesztések és T-, V-, 1/2 V tompavaratok esetében a varratméret a_w (mm) függvényében.

Vágási technológia	Vastagság t [mm]	$10^3 T_{CP}$
Acetilén (normál sebesség)	1-6	$1.1388t^{0.25}$
Acetilén (nagy sebesség)	1-6	$0.9561t^{0.25}$
Stabilizált gázkeverék (normál sebesség)	1-6	$1.1906t^{0.25}$
Stabilizált gázkeverék (nagy sebesség)	1-6	$1.0858t^{0.23}$
Propán (normál sebesség)	1-6	$1.2941t^{0.24}$
Propán (nagy sebesség)	1-6	$1.1051t^{0.25}$
Lézer	1-6	$(0,144+0,452 t^{0.5})^2$
Vízsugaras	1-6	$(0,511+0,251 t^{0.5} \ln(t))^2$
Plazma	1-6	$(0,447+0,384 \ln(t^2))^2$

Acél vágása plazmával. A plazmavágás során a fémet magas hőmérsékletű, nagy sebességű ionizált plazmasugárral vágják. A plazma hőmérséklete nagyjából 5500 Celsius-fok és 28 000 Celsius-fok között mozog. A plazmavágandó anyagtól függően a szokásos sűrített műhelylevegő, oxigén, argon és hidrogén, illetve nitrogén és hidrogén is a felhasznált gázok közé tartozik. A gázgát levegőből, vízből vagy szén-dioxidból is

készülhet. A 2. táblázat a különböző vágási technológiák vágási idejét mutatja. Ezeket különböző a datok és a TableCurve2D közelítő szoftver segítségével számították ki. Az idő méterenként percben van megadva, a t lemeztvastagság és a varratméret $a_w (=0,7*t$ egyoldali hegesztés esetén) pedig milliméterben.

A 2. ábra a különböző vágórendszerek vágási idejét hasonlítja össze. Vékony lemezeknél (1 mm-nél kisebb) nyilvánvalóan a lézer-, a plazma- és a vízsugaras vágás a leggyorsabb, míg a vastagabb lemezeknél (5-6 mm) a lézervágás és a nagysebességű acetilénvágás a leggyorsabb.



2. ábra. A lemezek vágási ideje, T_{CP} (perc/m) a varrat méret a_w (mm) függvényében a hosszanti hézagolt hegesztések és a T -, V -, $1/2 V$ tompavarratok esetében.

2.9. Felület-előkészítési idő

A felület előkészítése magában foglalja a felület tisztítását homokkal, jéggel és más módszerekkel. A következő képlet használható a felület tisztítási idő kiszámítására a felület területének (A_s [mm²]) függvényében:

$$T_{SP} = \theta_{ds} a_{sp} A_s, \quad (8)$$

ahol θ_{ds} egy nehézségi paraméter és $a_{sp} = 2 \times 10^{-6}$ perc/mm².

2.10. Festési idő

Az alap- és fedőréteg elkészítése a festéssel jár. A következő képlet segítségével kiszámítható a festési idő a felület (A_s [mm²]) függvényében:

$$T_P = \theta_{dp} (a_{gc} + a_{tc}) A_s, \quad (9)$$

ahol $a_{gc} = 2 \times 10^{-6}$ perc/mm² az alapozóréteg paramétere, $a_{tc} = 2,85 \times 10^{-6}$ perc/mm² a fedőréteg paramétere, θ_{dp} a

nehézségi tényező, $\theta_{dp} = 1,2$ vagy 3 vízszintes, függőleges vagy felülről történő festés esetén.

2.11. Teljes költség (szerkezeti megközelítés)

A korábban meghatározott összes költségkategória beletartozik a teljes költségbe.

$$\frac{K}{k_M} = \rho V + \frac{k_F}{k_M} \sum_i T_i \quad (10)$$

Az acél, mint anyag költségei elérhetik a $k_M = 1,0-1,5$ \$/kg/kilogrammot. A gyártási költség K_f [\$], a gyártási költségtényező pedig k_F [\$/perc]. A gyártási idő $k_F = 0-1$ \$/perc és T_i [perc]. Egy adott gyártó esetében a k_F értéke feltételezhetően állandó marad.

A k_F/k_M arány 0 és 2 kg/perc között mozog. Ha $k_F/k_M = 0$, akkor kapjuk a legkisebb tömeget. Ha $k_F/k_M = 2,0$, az jelentős munkaerőköltséggel jár (Japán, USA), $k_F/k_M = 1,0$ fejlett ország munkaerőköltségét jelenti, $k_F/k_M = 0,5$ az elmaradott ország munkaerőköltségét jelenti. Bár a termelési ráták ezekben a helyzetekben azonosak, a különböző munkaerőköltségek miatt a költségkülönbségek jelentősek.

3. KÖRNYEZETI KÖLTSÉGMEGKÖZELÍTÉS

A környezeti hatás megközelítése két pilléren nyugszik: az acél, vagy fém előállítása során adódó környezeti hatások, valamint a hegesztésből adódó környezeti hatások. A hegesztés az iparban a fémek összekapcsolásának legelterjedtebb technikája, de sok mérgező füstöt és vegyi anyagot is termel. A folyamatok gépesítése és automatizálása ellenére a hegesztőgázoknak kitett hegesztők száma folyamatosan nő, mivel új hegesztési módszereket és fogyóanyagokat alkalmaznak. A hegesztési módszer kiválasztásának egyik legfontosabb kritériuma a környezetbarát jelleg, szem előtt tartva, hogy a mérgező gázok és vegyi anyagok időnként túlléphetik az expozíciós határértékeket. A hegesztésnek számos lehetséges hatása van, és az iparág még mindig kutatja a hegesztők rendszeres hegesztési füstöknek és gázoknak való kitettségének és az éghajlati viszonyokra gyakorolt hatását.

A hegesztés során számos gőz és gáz keletkezhet. A hegesztési füstök fémtartalmú aeroszolok, amelyek a hegesztési folyamat összetett gőzölési, kondenzációs és oxidációs folyamatai során keletkező részecskékből állnak. Számos cikk és szabvány foglalkozik ezzel a témával [21], valamint az élettartamra való méretezéssel [22-26].

A fémfüstök egészségügyi következményei a jelen lévő fémektől függően változnak. Még így is féltő, hogy a fémfüstláztól kezdve a hosszú távú tüdőkárosodásig és neurológiai problémákig, beleértve a tüdőrákot és a Parkinson-kórt is, mindent okozhatnak. A hatás meghatározásához mikroötözött acélt hegesztettek két különböző töltőanyaggal (fémszálas huzal és

önárményező huzal) [21]. A hegesztés során megmérték a porkibocsátást, a CO, CO₂, Mn, SO, Al, Ni, Ca, Cr, Cr(VI) és P értékeket. A két töltőanyag eredményeinek vizsgálatakor kiderült, hogy a fémszál huzalban a mangán és a CO magas koncentrációja, valamint az önárményező huzalban a foszfor és az alumínium magas koncentrációja további figyelmet igényel. A felszabaduló füst és gázok mennyisége összefügg az alkalmazott hegesztési technikával.

A gyújtószál huzalok gyártói és feldolgozói még mindig keresik a fémszál hegesztési eljárás javításának lehetőségeit. Mindkét nagy lerakási határfok eléréséhez még egy utolsó akadályt kellett leküzdeniük. A cél az volt, hogy a nagy folyótűs huzal termelékenységét úgy ériék el, hogy közben a szilárd fémhuzalos ívhegesztőhuzal lerafordási hatékonysága magas maradjon [21]. A különböző hegesztési körülmények között kimutatott csökkentett füstszint az egyik legjelentősebb előrelépés az új generációs fémszál huzaloknál. Olyan alkalmazásokban használhatók, ahol a füstöt csökkenteni kell, mivel a fémhuzalok ezen új generációja a hasonló fémhuzalokhoz képest 20-50 százalékkal a lacsonyabb füstszintet produkál.

A fémhuzalos és az önvédő porbeles (FCAW-S) huzalok között az az elsődleges különbség, hogy az előbbi külső védőgázt igényel, míg az utóbbi nem. Bár az FCAW-S huzalok hegesztett kötésenként jellemzően jelentősebb füstöt termelnek, a hegesztési zóna a füst elszívásával biztonságban tartható. Az FCAW-S huzalok ideálisak kültéri használatra, mivel jól tűrik a szelet/időjárást, még akkor is, ha jellemzően nagyobb füstgáz keletkezik hegesztési varratonként.

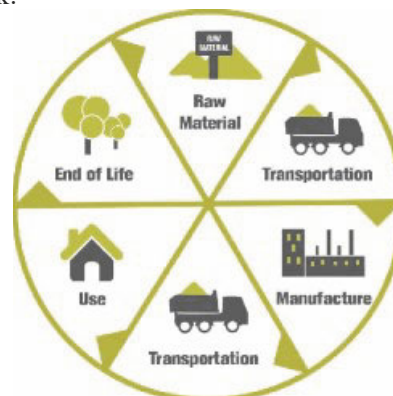
A fémszál huzalok és az önvédő porbeles huzalok viszonylag újszerű töltőanyagok, és elegendő kísérleti adat nem támasztotta alá alkalmazásukat. Bár a fémszál és az önárményező huzalok drágábbak (20-25%-kal), mint a folyósított és tömör huzalok, a velük való munka stabil ívet, intenzív behatolást és minimális szórást tesz lehetővé. Az önárményező huzalok magasabb CO₂-koncentrációja valószínűleg a fluxusban lévő megnövekedett karbonát- és cellulózmennyiségnek köszönhető, amely az égés során gázvédelmet biztosít. A fémszál huzalból felszabaduló CO-koncentráció tízszerese az önárményező huzalénak, és háromszorosa a megengedett maximális szintnek. Az ilyen magas CO-koncentráció valószínűleg a nem megfelelő fluxus elégetésének és a CO₂ mint védőgáz-komponens lebomlásának az eredménye. Az ésszerű ipari higiéniai eljárásoknak megfelelően műszaki ellenőrzéseket kell alkalmazni a környezeti koncentrációknak az elfogadható expozíciós szintre való korlátozása érdekében.

3.1. Életciklus-értékelés (LCA)

Az LCA egy tudományosan validált módszer a környezeti hatások becslésére és értékelésére az idő folyamán. Az LCA a nyersanyagtól a végső ártalmatlanításig minden folyamatot elemez, beleértve a gyártást, a forgalmazást és a felhasználást. Az LCA az

üvegházhatású gázok kibocsátásán (vagy a szénlábnyomon) kívül olyan következményeket is elemezhet, mint az ózonréteg csökkenése, az eutrofizáció, az emberi egészségre gyakorolt hatások és még sok más (3. ábra). Az LCA teljesen automatizálható és teljes mértékben beépíthető a munkafolyamatba anélkül, hogy azt megzavarná vagy lelassítaná. Ez lehetővé teszi a költséghatékony teljesítményértékelést.

Ha egy tárgy vagy folyamat beszerzésére, birtoklására, üzemeltetésére, karbantartására és végső soron ártalmatlanítására több, egymással versengő lehetőség is elfogadható műszaki okokból, az életciklus-költség-elemzés (LCCA) olyan módszer, amellyel a legköltséghatékonyabb lehetőséget lehet megtalálni közöttük.



3. ábra. A környezeti hatások rendszere (https://www.researchgate.net/figure/Life-Cycle-Assessment-LCA_fig2_315762443)

3.2. Főbb figyelembe veendő környezeti hatások

Általános számítási módszer

$$impact_{cat} = \sum_i m_i \times charact_factor_{cat,i} \quad (11)$$

ahol m_i az a cél (fém) össztömege és $charact_factor_{cat,i}$ az a adott hatáskategóriára vonatkozó tényezője.

3.3. A lehetséges környezeti hatások kiszámítása

Az életciklus-értékelés célja az elismert inputok és kibocsátások potenciális környezeti hatásainak meghatározása. A következő bekezdések az LCA-ban leggyakrabban használt környezeti kategóriák gyors bemutatását tartalmazzák, az egyszerűsített módszertani vázlatban használt megfelelő számítási módszerrel együtt.

A következő bekezdésekben gyorsan bemutatjuk az LCA-ban leggyakrabban használt környezeti kategóriákat, valamint az ebben a cikkben ismertetett egyszerűsített módszertanban használt megfelelő számítási módszert. Az LCA választható lépéseivel kapcsolatban gyakran van szükség normalizálásra annak szemléltetésére, hogy egy hatáskategória milyen mértékben járul hozzá jelentősen a teljes környezeti

hatáshoz. Az egyes hatáskategóriák normalizált mutatóeredményeihez a súlyozási lépésben több tényezőt rendelnek hozzá a megfelelő fontosságuk alapján.

3.4. Globális felmelegedési potenciál (GWP)

A Föld légkörében természetesen jelen lévő infravörös (IR) aktív gázok (pl. O₃, H₂O és CO₂) elnyelik és visszaverik a Földről távozó földi (infravörös) energia (vagy sugárzás) egy részét, hozzájárulva a felszín és az alsó légkör felmelegedéséhez. Amint a 3. táblázatban látható, az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület a három legjelentősebb üvegházhatású gázra és három időhorizontra -20, 100 és 500 évre - számitott GWP-eket.

3. táblázat. GWP-k bizonyos időszakokra (kg CO₂-egyenértékben kifejezve) [22].

	20 év	100 év	500 év
Szén-dioxid (CO ₂)	1	1	1
Metán (CH ₄)	62	25	7
Dinitrogén-oxide (N ₂ O)	275	298	156

A (11) egyenlet eredményeként a "Globális felmelegedés" mutatót a következőképpen határozzuk meg:

$$Global\ Warming = \sum_i GWP_i \times m_i \quad (12)$$

ahol m_i a kibocsátott i anyag tömege (kg-ban). Ezt a mérőszámot kilogramm CO₂-egyenértékben mérik. A kiválasztott stratégia csak egy 10 éves időhorizontra vonatkozik.

3.5. Savasodási potenciál (AP)

A légszennyező anyagok (főként ammónia (NH₃), kén-dioxid (SO₂) és nitrogén-oxidok (NO_x) savas vegyületekké történő átalakulását savasodásnak nevezzük. A szél a savasító vegyi anyagokat a légkörbe szállítja, ahol savas részecskék, savas eső vagy hó formájában lerakódnak.

A savasodási potenciál kiszámítható az anyagnak a savasodást okozó H⁺-ionok keletkezésére való képessége vagy egy egyenértékű SO₂-kibocsátás alapján. A RAINS-LCA modellt, amely figyelembe veszi a helyszínt, a háttérben lévő lerakódásokat és hatásokat [24], használták a jellemzési változók kidolgozásához ebben a munkában. Ennek eredményeként az 5. táblázat a savasodásra vonatkozó átlagos európai jellemzési tényezőket mutatja.

4. táblázat. - A savasodási potenciálok (kg SO₂-egyenértékben) [24].

	Ammónia (NH ₃)	Nitrogén-oxid (NO _x)	Kén-dioxid (SO ₂)
AP _i	1.60	0.50	1.20

Ennek eredményeképpen az indikátor savasodását a következőkkel határozzuk meg,

$$Acidification = \sum_i AP_i \times m_i \quad (13)$$

ahol m_i a kibocsátott i anyag tömege (kg-ban). Ezt a mérőszámot kilogramm SO₂-egyenértékben mérik.

4. SZEMLELTETŐ PÉLDA

Sokan foglalkoztak az életciklus elemzésekkel, az energia felhasználással, a hegesztési eljárások környezeti hatásaival [27-39]. Az életciklus-értékelés előző bekezdésekben tárgyalt számos fázisának bemutatására egy rövid példát mutatunk be. Feltételezve, hogy a gyártás során különböző hegesztőhuzalokat használtak [21], a leltározási szakaszban a következő kibocsátásokat gyűjtötték össze (lásd a 4. táblázatot):

4. táblázat. A különböző hegesztőhuzalok felhasználásával történő gyártás során összegzett kibocsátások [21].

	Fémhuzal	Önvedő porbeles huzal
Kibocsátás	Erték (kg/m ³ -ben)	Erték (kg/m ³ -ben)
szén-monoxid (CO)	0,00181	0,000172
szén-dioxid (CO ₂)	0,03590	0,05760
kén-dioxid (SO ₂)	0,0000209	0,0000262

A számítás eredményeképpen az egyes környezeti kategóriák hatásait úgy határozzák meg, hogy minden egyes hozzájáruló kibocsátást megszoroznak a kategóriába sorolási tényezővel (pl. GWP esetében: 0,00181 x 1,53 + 0,0359 x 1,00 = 0,03869 kg CO₂-egyenérték a fémszálas huzal esetében, 0,000172 x 1,53 + 0,0576 x 1,00 = 0,05786 kg CO₂-egyenérték az önármékolt huzal esetében), ami a 6. táblázatban látható eredményeket eredményezi azonos mennyiségű hegesztés esetén.

6. táblázat. - A kiválasztott környezeti mutatók végső eredményei

	GWP (kg CO ₂ -egyenérték)	AP (kg SO ₂ -egyenérték)
fémhuzal	0.03869	0.000025
önvedő porbeles huzal	0.05786	0.0000314

A példa jól mutatja a fémszálas huzal kisebb környezeti hatását. A kérdés, hogyan kapcsoljuk össze a szerkezeti méretek optimalizálását és a globális környezeti hatásokat, valamint a hegesztési technológia és az elektróda környezeti hatását. A szerkezeti méretek optimalizálása esetén akár tömegre, akár költségre végezzük,

a végeredmény tömegcsökkenés a felhasznált acélnál. A globális környezeti hatásonál elsődlegesen a tömeggel arányos összefüggések szerepelnek, tehát a tömegcsökkenés környezeti hatás csökkenést eredményez. A hegesztési technológiánál, illetve elektródánál a környezeti hatáshoz a varrat méretétől függ, vagyis áttételesen a tömegtől. Mivel a tömegtől való függés minden részénél megvan, de eltérő módon, ezért a legjobb megközelítés a többcélű függvényes optimalítás, ahol a három terület részben önállóan, részben együtt szerepel.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A hegesztés során keletkező káros füstöket és gázokat is figyelembe kell venni. A hegesztési technológiától függően a CO₂, CO, CH₄, NO_x stb. mennyisége eltérő lehet. Különböző huzalok, fémmagos és önvédő porbeles huzalok állnak rendelkezésünkre. Az összehasonlított két huzal további szén-monoxid (CO), szén-dioxid (CO₂) és kén-dioxid (SO₂) mennyiséget eredményez. A globális felmelegedési potenciálra és a savasodási potenciálra vonatkozó valós értékük a felhasznált időtől függ. Az energiafelhasználás is nagy lehet, ha hosszabb időt, például évtizedeket veszünk figyelembe. Az ismertetett megközelítéssel a szerkezeti méretek optimalizálását, a globális környezeti hatásokat, valamint a hegesztési technológia és az elektróda környezeti hatását egyaránt figyelembe tudjuk venni. Normált többcélű függvényes optimalizálással elvégezhető a legjobb méretekkel rendelkező és a legkisebb környezeti terhelést jelentő hegesztési technológia és elektróda kiválasztása. Ez még további mintaszámításokat igényel.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatásával a K 134358 nyilvántartási számú projekt keretében valósult meg.

7. IRODALOM

- [1] Klansek, U. & Kravanja, S.: Cost Estimation, Optimisation and Competitiveness of Different Composite Floor Systems – Part 1. Self manufacturing cost estimation of composite and steel structures, Journal of Constructional Steel Research, 62(5), 434-448 (2006).
- [2] Farineau T. et al.: Use of Parametric Models in an Economic Evaluation Step During the Design Phase, Int J Adv Manuf Technol (2001) 17: pp. 79–86, 2001 Springer-Verlag London Ltd.
- [3] Farkas, J. & Jármay, K.: Analysis and Optimum Design of Metal Structures. Balkema Publishers, Rotterdam, Brookfield, (1997).
- [4] Farkas, J. & Jármay, K. (2003) Economic design of metal structures, Millpress Science Publisher, Rotterdam, 340p. ISBN 90 7701 799 2
- [5] Farkas, J., Jármay, K. (2008): Design and optimisation of metal structures, Horwood Publishers, Chichester, UK, 2008: 328. ISBN: 978-1-904275-29-9
- [6] Mela, K., Heinisuo, M.: Weight and Cost Optimisation of Welded High Strength Steel Beams, Engineering Structures, 79(15), 354-364 (2014).
- [7] Kovács Gy., Farkas J.: Minimum cost design of overhead crane beam with box section strengthened by CFRP laminates, Structural Engineering and Mechanics 61(4), 475-481 (2017).
- [8] London Metal Exchange, <https://www.lme.com/>, accessed 12 June 2021
- [9] Pahl, G. & Beelich, K.H.: Kostenwachstumsgesetze nach Ähnlichkeits-beziehungen für Schweissverbindungen. VDI-Bericht, Nr. 457, 129-141, Düsseldorf, (1992).
- [10] Jármay, K. & Farkas, J.: Cost Calculation and Optimisation of Welded Steel Structures, Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, 50(2), 115-135 (1999).
- [11] Bodt, H.J.M.: The Global Approach to Welding Costs. The Netherlands Institute of Welding, The Hague, (1990).
- [12] COSTCOMP: Programm zur Berechnung der Schweisskosten. Deutscher Verlag für Schweisstechnik, Düsseldorf, (2002).
- [13] Ott, H.H. & Hubka, V.: Vorausberechnung der Herstellkosten von Schweiss-konstruktionen (Fabrication cost calculation of welded structures). Proc. Int. Conference on Engineering Design ICED, 1985, Hamburg, 478-487. Heurista, Zürich, (1985).
- [14] TIG welding calculator, <https://www.millerwelds.com/resources/weld-setting-calculators/tig-welding-calculator> (last accessed on May 31, 2021).
- [15] Estimating and comparing weld metal costs, http://www.esabna.com/euweb/awtc/lesson9_1.htm (last accessed on May 31, 2021).
- [16] Laser welding: <http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Great%20Designs%20in%20Steel/GDIS%202013/Laser%20Welding%20101%20Case%20Studies%20Part%20I.pdf>
- [17] Dawes, Ch.: Laser Welding: A Practical Guide, Woodhead Publishing, 258p. 1992.
- [18] Laser Comparison – Cutting Speed and Rate of Feed, <http://jmtusa.com/laser-comparison-cutting-speed-and-rate-of-feed/> (last accessed on 12 June, 2021).
- [19] Lincoln Electric Cutting speeds, <https://torchmate.com/metric-measures/Recommended-Cut-Speeds> (last accessed on May 31, 2021).
- [20] KMT Waterjet Calculator for 90,000 PSI - 50,000 PSI Cutting Speeds, <https://www.kmtwaterjet.com/kmt-cut-calculator.aspx> (last accessed on May 31, 2021).
- [21] Olivera Popović et al. Fume and gas emission during arc welding: Hazards and recommendation,

- Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37 (2014) pp. 509–516.
- [22] IPCC. 2007. Fourth Assessment Report – Climate Change 2007. IPCC, Geneva, Switzerland
- [23] Heijungs. R., Guinée. J., Huppes. G., Lankreijer. R., Udo de Haes. H., Sleswijk. A., Ansems. A., Egges. P., van Duin. R. and de Goede. H. 1992. Environmental Life Cycle Assessment of products. Guide and Backgrounds. CML. Leiden University. Leiden.
- [24] Huijbregts. M. Uncertainty and variability in environmental life-cycle assessment. PhD. Thesis. University of Amsterdam, 2001, The Netherlands.
- [25] Guinée, J.B. et al. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 2002, 692 pp.
- [26] Charalamos Loukas et al.: A cost-function driven adaptive welding framework for multi-pass robotic welding, Journal of Manufacturing Processes 67 (2021) 545–561, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.004>
- [27] ISO 14040:2006, International Standard 2006-07-01, Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework, 41 p. International Organization for Standardisation
- [28] ISO 14044:2006, International Standard, First edition, 2006-07-01, Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, 7 p. International Organization for Standardisation
- [29] Pekka Vuorinen: CEN standardisation on sustainability of construction works, ETSI 14-15 May 2012 Finnish Association of Construction Product Industries, CEN/TC350/WG6 "Civil engineering works"
- [30] Pankaj Kumar. J. Mistry: Impact of Welding Processes on Environment and Health, International Journal of Advanced Research in Mechanical Engineering & Technology (IJARMET) Vol. 1, Issue 1 (Apr. - Jun. 2015) ISSN: 2454-4736
- [31] Ya-Ju Chang et al.: Environmental and Social Life Cycle Assessment of welding technologies, Procedia CIRP 26 (2015) 293–298, 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing.
- [32] Farideh Golbabaie and Monireh Khadem: Air Pollution in Welding Processes — Assessment and Control Methods, 33 p. <http://dx.doi.org/10.5772/59793> (accessed on 12 June 2021)
- [33] Gunther Sproesser et al.: Sustainable Technologies for Thick Metal Plate Welding, Sustainable Manufacturing, pp 71-84, 2017. in Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management, Springer Verlag.
- [34] Jenkins, N.T., and T.W. Eagar. 2005. Chemical analysis of welding fume particles. Welding Journal 84(6): 87s–93s.
- [35] Mostafa Hashemi Fard, Mohsen Hashemi Fa: Impacts of Welding on Environmental Problems and Health and Solutions to Overcome these Problems, <https://www.semanticscholar.org/paper/Impact-of-Welding-Processes-on-Environment-and-Kumar-Mistry/d0848b8c3bc952fd9bd21ce3bf2a4f03f5d6caf1> (last accessed 12 June 2021)
- [36] Nayara de Souza: Total Fume Emissions and Emission Factors Applicable to Gas Total Fume Emissions and Emission Factors Applicable to Gas Metal Arc Welding, University of New Orleans. Dissertations and Theses Spring 5-23-2019, 89 p.
- [37] Fruehan R. J. et al., "[Theoretical Minimum Energies to Produce Steel](#)," Energetics, Inc., March 2000. <file:///C:/Users/Me/Downloads/fruehan-mar00.pdf>
- [38] Nikolas Martelaro: Energy Use in US Steel Manufacturing, December 4, 2016, <http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/martelaro1/>
- [39] Kun He, Li Wang and Xiaoyan Li: Review of the Energy Consumption and Production Structure of China's Steel Industry: Current Situation and Future Development, Metals 2020, 10(3), 302; <https://doi.org/10.3390/met10030302>

NIKKEL-BÁZISÚ SZUPERÖTVÖZETEK FORGÁCSOLHATÓSÁGÁNAK PROBLÉMAKÖRE

PROBLEMS OF MACHINABILITY OF NICKEL-BASED SUPERALLOYS

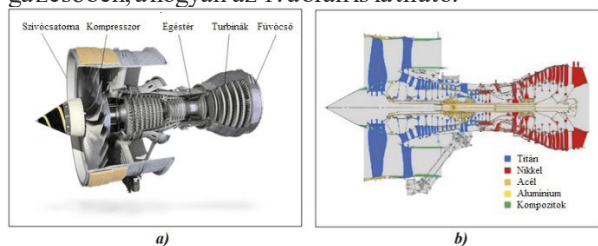
Kónya Gábor*, Kovács Zsolt Ferenc**

ABSTRACT

In this paper, the problems of machinability of nickel-based superalloys are discussed, why machinability of these materials is so difficult, and the importance of R&D for industry. These superalloys are some of the most difficult materials to machine and are widely used as raw materials for gas turbines in the aerospace and energy industries. Based on the industry experience, slot milling causes the biggest problem, tool wear quickly and breakages are common. Due to the high thermal strength and hardness, the cutting zone is subjected to high shear stresses, resulting in increased cutting forces and cutting temperatures, which will also stress the tool edge due to the extremely poor thermal conductivity of the material. In this paper, we will briefly summarize why the machinability of these materials is so difficult, which data influences on tool life. Based on our research, we presented the effects of tool paths and cooling-lubricating processes on the cutting tool life.

1. BEVEZETÉS

A Nikkel-bázisú szuperötvözeteket elsősorban a repülőgép- és energetikai iparban használják gázturbinák alapanyagaként [1], főként a magas hőmérsékletű részekben, mint például az égéstérben, a turbinában és a gázcsőben, a hogyan az 1. ábrán is látható.



1. ábra Rolls-Royce Trent 800 típusú gázturбина a) egyes részegységei [6], b) teljes metszete és a részegységeknél felhasznált alapanyagok [7]

Üzemelésük során jellemző az 1400-1500 °C-os üzemi hőmérséklet [2], akár 40 bar nyomáson [3] extrém korrózív környezetben, mindeközben az üzemi

fordulatszámuk a 10 000 1/percet is meghaladja [4]. Ez a magas üzemi hőmérséklet a gázturbinák hatásfokának növeléséhez szükséges, hiszen a hatásfok növelése a többi hőerőgéphez hasonlóan úgy lehetséges, hogy a munkaközeg maximum-és minimum hőmérséklete közti különbséget növeljük. A ma használatos gázturbinák hatásfoka megközelíti a 60%-ot [5].

Az alkalmazási területből adódóan a szuperötvözetekkel szemben támasztott követelmények közé tartozik a nagy melegszilárdság, a nagy keménység, a hő-és korrózióállósággal szembeni ellenálló képesség. Ezen tulajdonságaik miatt a különösen nehezen megmunkálható anyagok közé tartoznak, azonban a belőlük készült alkatrészek zömét mégis forgácsolással állítják elő [8]. Kutatásaink során a GTD-111, speciális vákuumöntéssel előállított Ni-bázisú szuperötvözet forgácsolhatóságával foglalkozunk. Megmunkálhatósága lényegesen rosszabb, mint az általánosságban vizsgált, széles körben ismert és elérhető Inconel 718-é. Az 1. táblázatban a GTD-111, az Inconel 718 és a referencia anyagként általánosan elfogadott C45 mechanikai- és fizikai tulajdonságainak összehasonlítása látható. A feltüntetett adatok alapján megállapítható, hogy a GTD-111 forgácsolása lényegesen nehezebb feladat, mint az Inconel 718-é. Összehasonlítva a C45-tel látható, hogy a szuperötvözetek megmunkálása miért oly nehéz feladat.

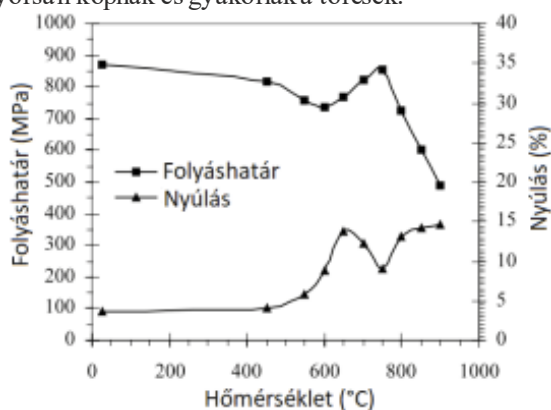
1. táblázat GTD-111, Inconel 718 és C45 mechanikai- és fizikai tulajdonságai [9] [10]

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

* tanársegéd, Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék

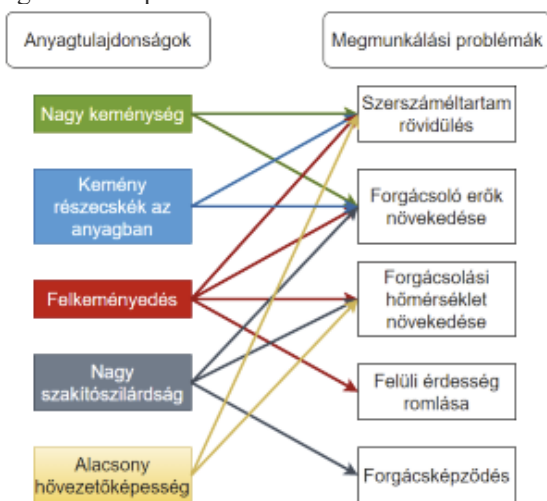
** egyetemi docens, Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék

A GTD-111 folyáshatárának és nyúlásának hőmérsékletfüggése a 2. ábrán figyelhető meg. Látható, hogy tulajdonságaikat nagyon magas hőmérsékleten is megtartják, emiatt válnak oly nehezen forgácsolhatóvá, mert a nagy szilárdságnak és keménységnek köszönhetően nagy nyíróerők ébrednek a forgácsolási zónában, valamint a megmunkálás során keletkező nagy hőmérséklet a rendkívül rossz hővezető képesség miatt nem tud a forgácsba és a munkadarabra távozni, ennek következtében a szerszám élén fog koncentrálni. Ennek eredményeképpen a forgácsoló szerszámok gyorsan kopnak és gyakoriak a törések.



2. ábra GTD-111 folyáshatárának és nyúlásának hőmérsékletfüggése [11]

Az egyes anyagtulajdonságokból származó megmunkálási problémákat a 3. ábra szemlélteti.

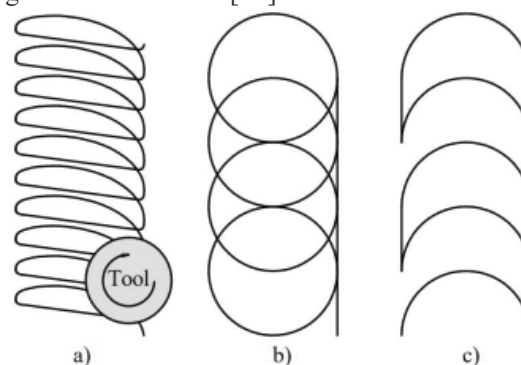


3. ábra Anyagtulajdonságok befolyásolása a megmunkálási problémákra [12]

2. HORONYMARÁSI STRATÉGIÁK HATÁSAINAK VIZSGÁLATA

E kutatás során GTD-111 szuperötvözetet forgácsoltak három trochoidális szerszám pályával: **i)** az Autodesk Inventor HSM® a adaptív-, **ii)** a körkörös- és **iii)** a Szalki és társai által is vizsgált lengő inga [13] stratégiák (4.

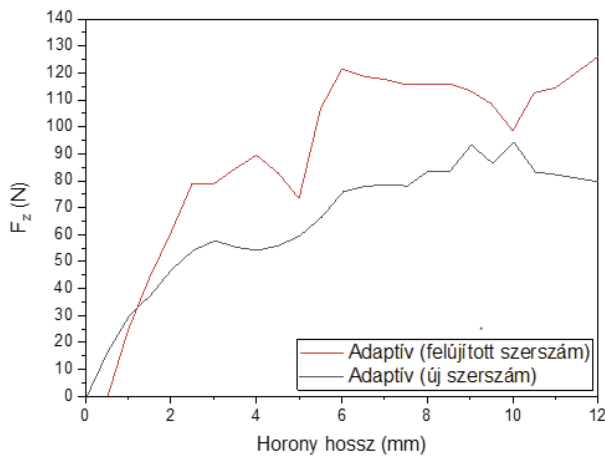
ábra) hatásait vizsgáltuk a forgácsoló erők- és nyomatékokra, a szerszámkopásra és a megmunkált felület érdességére nézve. Az alkalmazott technológiai paraméterek a következők voltak, a forgácsoló sebesség $v_c = 19$ m/perc, a fogankénti előtolás $f_z = 0,02$ mm/fog, a radiális fogásvétel $a_e = 0,2$ mm volt. Mindegyik stratégia esetén 1 db új és 1 db újraélezett és egyúttal újra bevonatolt Walter Proto maxTMST H4038217-8-1 típusú, 8 mm átmérőjű 4 élű tömör keményfém szerszámot használtak, TiN bevonattal. A horony hossza és szélessége 12 mm, míg a mélysége 8 mm, melyet egy fogásban munkáltak ki [14].



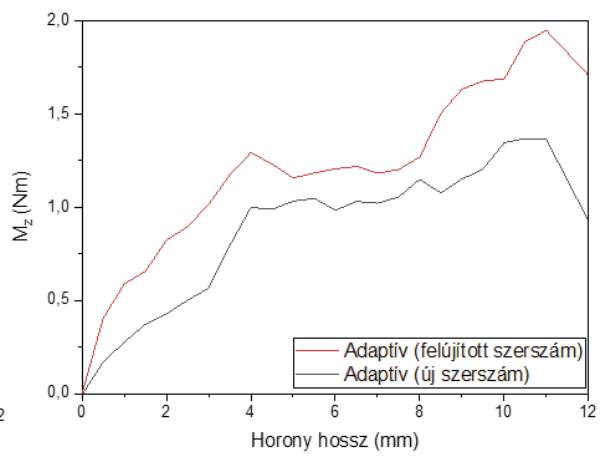
4. ábra Használt trochoidális szerszám pályák: a) adaptív, b) körkörös, c) lengő [14]

Az új- és felújított szerszámok teljesítőképességének vizsgálata azért fontos, mert az iparban nagyon sok esetben használnak felújított szerszámokat a költségcsökkentés érdekében. A felújítás összege körülbelül a negyede az új szerszám árának. Általánosságban elmondható, hogy az új szerszámokkal történő megmunkálások során aacsonyabb szerszámterhelés figyelhető meg, mint a felújított társaiknál, azonban a lengő stratégia esetén a felújított szerszám bizonyult jobbnak. Ez annak köszönhető, hogy megmunkálás előtt megvizsgálva a szerszámokat azt látni, hogy a köszörülés során mindegyik esetben máshogy néz ki a szerszámgeometria, az eredeti geometriát egyik szerszám esetében sem sikerült tartani, így ebben az esetben valószínűleg a felújított szerszámnak jobb geometriát sikerült beköszörülni, mint amilyen az új szerszámé volt [14].

Stratégiákat összehasonlítva a legkedvezőbb szerszámterhelést az adaptív stratégiát használva kaphatjuk, a legrosszabbat pedig a lengő stratégiaival. Ez annak köszönhető, hogy az adaptív stratégia igyekszik a kontaktszöveget állandó értéken tartani a teljes megmunkálás során és nem tartalmaz éles irányváltásokat vagy frontális fogásvételeket, mint a másik két stratégia, ahol a fogásvétel egy egyenes mentén történik és nem egy ív mentén gördül be a szerszám [14]. Ezzel a technológiával a szerszámot terhelő dinamikus igénybevételek nagy mértékben csökkenthetők [14]. A szerszámokról készült felvételek a 8-10. ábrán figyelhető meg.

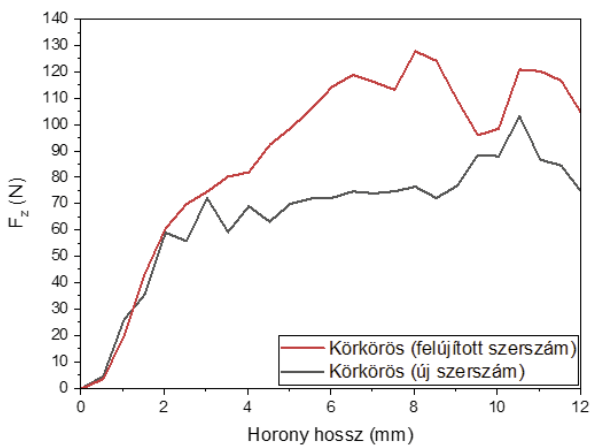


a)

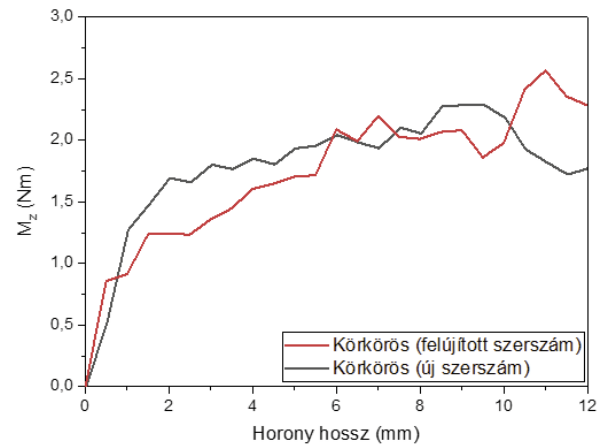


b)

5. ábra Forgácsoló a) erő és b) nyomaték alakulása a megmunkált horonyhossz függvényében adaptív stratégia esetén [14]

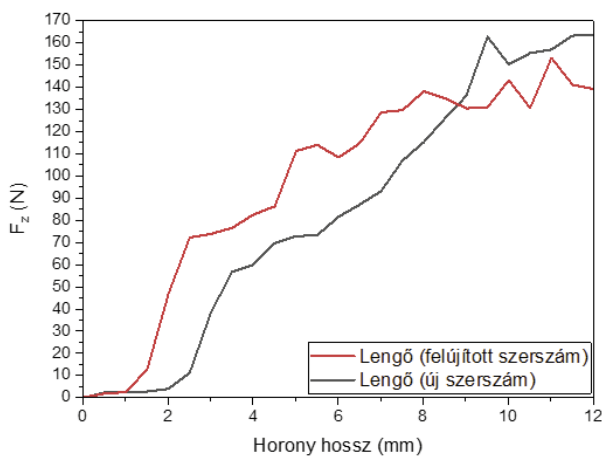


a)

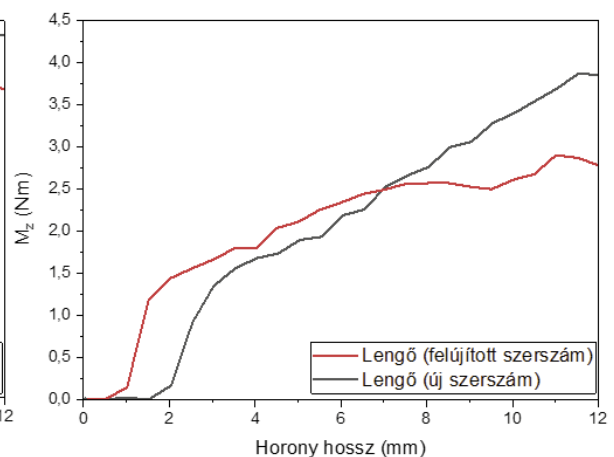


b)

6. ábra Forgácsoló a) erő és b) nyomaték alakulása a megmunkált horonyhossz függvényében körkörös stratégia esetén [14]



a)



b)

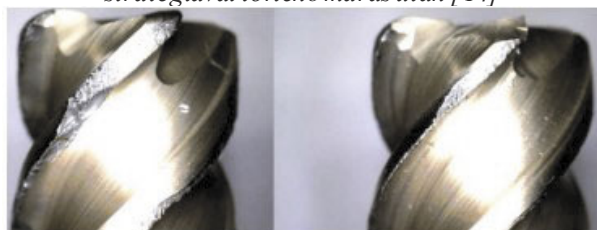
7. ábra Forgácsoló a) erő és b) nyomaték alakulása a megmunkált horonyhossz függvényében lengő stratégia esetén [14]



8. ábra Új- és felújított szerszámok adaptív stratégiával történt marás után [14]



9. ábra Új- és felújított szerszámok körkörös stratégiával történt marás után [14]

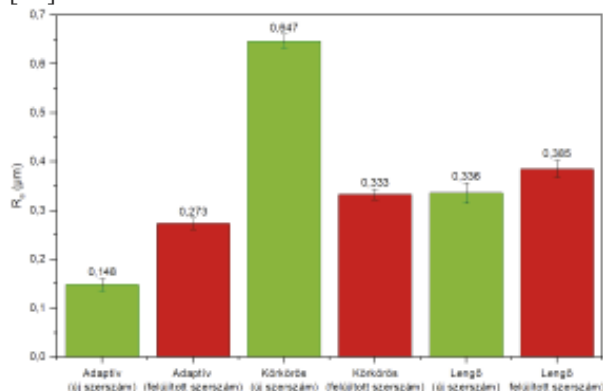


10. ábra Új- és felújított szerszámok lengő stratégiával történt marás után [14]

8-10. ábrán látható felvételeken megfigyelhető, hogy a szerszám kopásának mértéke megegyezik a szerszámterhelés mértékével. A legkisebb kopás azokon a szerszámokon figyelhető meg, melyek adaptív stratégiával voltak használva. Általánosságban elmondható, hogy az új szerszámok kisebb kopást mutatnak, mint a felújított szerszámok. Azonban érdemes megjegyezni, hogy a körkörös stratégia esetén az új szerszámon nagyobb kopás figyelhető meg, mint a felújított szerszámon, ez a megmunkált felületen is észrevehető, ahogyan a 11. ábrán látható. A legnagyobb szerszámkopás a lengő stratégiánál használt szerszámokon figyelhető meg, ami a szerszám pályán (4. ábra, c)) látható irányváltásoknak köszönhető [14].

Ahogyan a 11. ábrán látható, a legjobb felületi érdességet az adaptív stratégia, majd ezt követte a körkörös, míg a legrosszabbat a lengő stratégia eredményezte. Ez a stratégiákból eredő irányváltásokkal és azok mértékével van összefüggésben. A frontális fogásvétel szintén nagy rezgést generál a szerszámban, mely mindenképprontja a felület érdességét. A körkörös stratégia esetén azonban a felújított szerszám jobb felületi érdességet eredményezett, mint az új szerszám [14]. A szerszám szemszögéből nézve a szerszám homlokfelületén lévő éleknek van hatása a horony talp felületének érdességére. Ezt a nagy mértékű romlást

ezen élek letörése vagy nagymértékű kopása okozhatta [14].



11. ábra Az egyes stratégiákkal és szerszám típusokkal történt marás után mért átlagos felületi érdességek [14]

Valamennyi horony esetén megfigyelhető, hogy a mérettartás rendkívül rossz volt. A 12 mm horony hosszon 0,3...0,4 mm-t is szűkült a horony. Ez azért jelent problémát, mert a horony simításakor a leválasztandó forgácskeresztmetszet folyamatosan nőni fog, mely a megmunkálás biztonságát és minőségét veszélyeztetheti. A szerszám ily mértékben nem kopott, hogy a mérettartás ilyen rossz legyen. Ez annak köszönhető, hogy a szerszámból és a munkadarabból a dóódóan nagyon kis fogankénti előtolással (0,01...0,02 mm) lehet dolgozni, miközben a keményfém szerszámok élrádiusza ($\rho_\beta \approx 0,005 \dots 0,008$ mm) bevonattal együtt, bevonat nélkül a ($\rho_\beta \approx 0,002 \dots 0,003$ mm) szokott lenni. Így lényegében a szerszám éle nem tud behatolni az anyagba, hanem a nagyobb élrádiusz miatt először sűrűlódik, majd képlékeny deformációt okoz a megmunkálandó felületen, majd csak kisebb anyagmennyiséget fog leforgácsolni, miközben vasalási jelenség figyelhető meg a forgácsolási folyamat során. Ennek következtében az eredetileg tervezett anyagleválasztási mélység nem valósul meg, mely eredményeképpen rossz a mérettartás. Erre a problémára megoldás lehet egy olyan szerszám pálya megalkotása, mely figyelembe veszi ezt a jelenséget és folyamatosan növeli a szerszám pálya hurokát mértékét vagy adaptívan változtatja a fogankénti előtolást.

3. HŰTÉS-KENÉSI ELJÁRÁSOK HATÁSAINAK VIZSGÁLATA

A nehezen forgácsolható fémötvözetek kapcsán új kutatási terület kezd kialakulni, nevezetesen a kriogénhűtéssel segített forgácsolás. E témában kutatók úgy gondolják, hogy a hagyományos hűtő-kenő eljárások nem nyújtanak kellő hűtőhatást a szerszámra nézve, melyek a magas hőmérséklet miatt korán tönkremennek. A kriogenika nagyon alacsony hőmérsékleten végbemenő fizikai jelenségek előállításával és

alkalmazásával foglalkozó tudományág. A kriogén hőmérséklet az alkalmazott közegtől függően 0 K (-273 °C) és 243 K (-30 °C) közötti tartományban helyezkedik el, ez határozottan a lacsonyabb hőmérsékletet jelent, mint a hétköznapi folyamatok során tapasztaltak. Az ilyen lacsony hőmérsékletek az anyagjellemzőkre is hatással vannak, többek között: a hővezető képességre, az elektromos ellenállásra, a képlékenységre és a szilárdságra is [15].

A kriogén hűtési eljárást az élet számos területén alkalmazzák, mint például az autók [16] - és repülőgépiparban [17]. A kriogén hűtési eljárás két fő megoldásként jelenik meg ezen ötvözetek forgácsolásában, egyrészt hőkezeli a forgácsoló szerszámokat megmunkálás előtt, ezzel növelve a szerszám éltartamát, másrészt hűtőközegként juttatják oda a forgácsolási zónába [18].

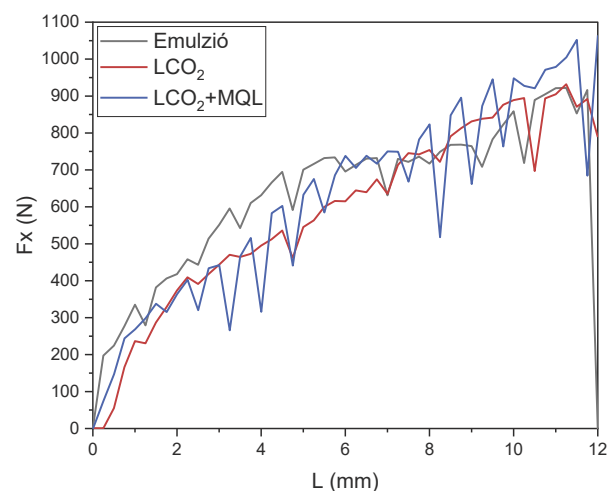
Leggyakrabban használt közegek a CO_2 és az LN_2 [19], azonban számos más közeg is alkalmaznak, min például argont, hidrogént, neont, héliumot és etánt [20]. Ezen közegeknek mindnek más-más a forráspontja. A forgácsolás technológia kapcsán a folyékony nitrogént (LN_2) és szén-dioxidot (CO_2) szoktak használni. A folyékony nitrogén forráspontja -196 °C, míg -210 °C-on válik szilárd halmazállapotúvá, ezért is nevezik (DCT – Deep Cryogenic Treatment) mélykriogén kezelésnek a folyamatot, mikor a nitrogént használják [21]. Ezzel szemben a CO_2 használata esetén egy jóval magasabb hőmérsékleten jön létre a kezelés, -78,5 °C-on, amit sekély kriogén kezelésnek neveznek (SCT – Shallow Cryogenic Treatment) [22]. Ennek az eljárásnak a jellegzetessége, hogy mikor a folyékony CO_2 elhagyja a fúvókát, és a hőmérséklet lecsökken, akkor szilárd- és gázformájú fázissá alakul át, ami egyrészt kedvező abból a szempontból, hogy egy vékony film réteget hoz létre a munkadarab-és a szerszám felülete között, azonban körülményes abból a szempontból, hogy a fúvóka kiáramló keresztmetszetét eldugíthatja [21].

Ezért teszteltük a folyékony szén-dioxiddal (LCO_2), az LCO_2 +MQL (Minimal Quantity Lubrication) kombinációval történő hűtést GTD-111 típusú Nikkelbázisú szuperötvözet forgácsolásakor és a kapott eredményeket összehasonlítottuk az emulziós hűtés során kapott eredményekkel. A kísérletek során minden esetben 12 mm hosszú, 10 mm mély és 12 mm széles hornyokat munkáltunk meg egy fogásban $v_c = 28$ m/perc forgácsoló sebességgel, $f_z = 0,01$ mm/fog fogankénti előtolással. Az oldallépés mértéke $a_e = 0,8$ mm volt. A kísérletek során Jacsó Ádám állandó kontaktszögét biztosító szerszám pályáját [23] használtuk 8 mm átmérőjű, 5 élű tömör keményfém szerszámokkal [24]. A kutatás során vizsgáltuk a hűtés-kenési eljárások hatását a munkadarabra ható forgácsoló erőre, a szerszámkopásra, a forgácsolásra és a megmunkált felület érdességére

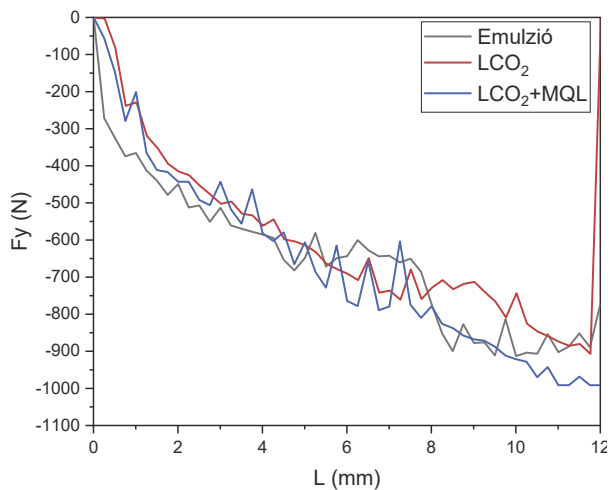
A munkadarabra ható erőkomponensek az egyes hűtő-kenési eljárások esetén a 12-14. ábrán láthatók. Az X- és Y-irányú erőknél a 12. és 13. ábrán megfigyelhető, hogy emulziós hűtésnél a megmunkálási hossz első felében nagyobb erő értékek voltak jellemzők a másik két hűtési módhoz képest. Ez a jelenség a maró hossz második felében változott és a folyékony szén-dioxidos hűtésnél mért értékekhez közelített, néhol alatta volt. A legnagyobb kilengéseket az LCO_2 és minimálkenés együttes alkalmazása hozta helyenként több, mint 150N-nal kisebb erőt mértünk a sima folyékony széndioxidos hűtésnél mérthez képest, azonban a horonymarás végső szakaszában itt figyelhető meg a legnagyobb 1050 N-os erőérték. A három görbét összevetve az LCO_2 -es hűtés esetében volt a legegyszerűsebb a terhelés felfutása, kisebb kilengések láthatók a diagramokon.

A Z-irányban fellépő erőknél (14. ábra) látható, hogy a folyékony szén-dioxidos és LCO_2 +MQL hűtésnél pozitív irányú erők voltak jellemzők, ezzel szemben emulziós hűtésnél negatív irányúak. A két pozitív irányú görbét összehasonlítva megfigyelhető, hogy a megmunkálás közel teljes hosszában kedvezőbbnek bizonyult a minimálkenés alkalmazása. Ennél a hűtési módnál rendre 100 N-nal kevesebb értékeket mértünk a sima LCO_2 -s hűtéshez képest. Az emulziós hűtés és a folyékony széndioxidos esetben mért erők, habár ellentétesek azok hasonló tendenciával változnak és közel azonos értékeket vesznek fel, utóbbinál kissé nagyobb kilengésekkel. A Z-irányú erőknél egyértelműen megállapítható, hogy az LCO_2 +MQL hűtési mód volt a legkedvezőbb.

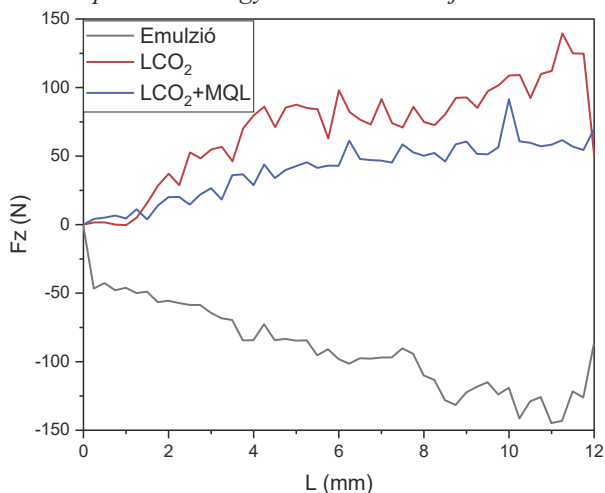
Ezek a tendenciák arra engednek következtetni, hogy az LCO_2 és LCO_2 +MQL eljárásoknál olyan a terhelés jellege, mintha a szerszám nyomná a munkadarabot, míg emulziós hűtés esetén a jelenség viszont olyan, mintha a szerszám a munkadarabot felakarná tépni a megfogás alól, mert ebben az esetben nehezebbé válik a forgácsleválasztás és a maró spiráljával nagyobb húzóerőt fejt ki.



12. ábra A munkadarabra ható X-irányú erőkomponensek az egyes hűtés-kenési eljárások esetén



13. ábra A munkadarabra ható Y-irányú erőkomponensek az egyes hűtés-kenési eljárások esetén

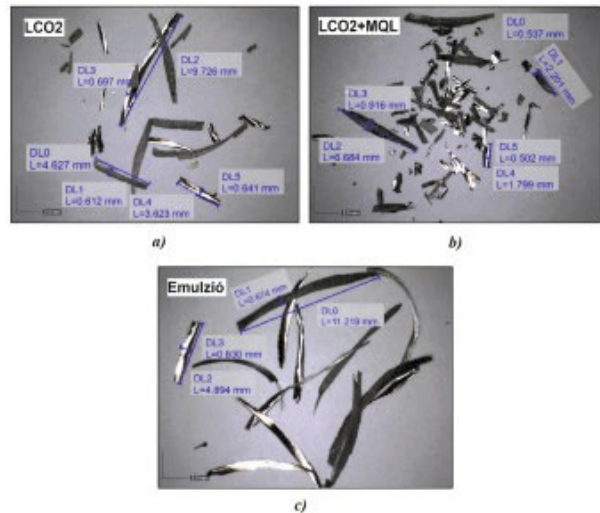


14. ábra A munkadarabra ható Z-irányú erőkomponensek az egyes hűtés-kenési eljárások esetén

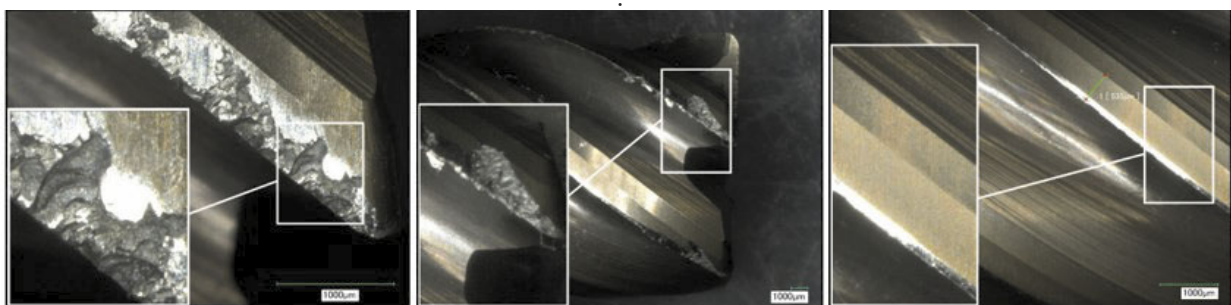
A forgácsoló szerszámkopásokról készült mikroszkópi felvételek a 15. ábrán láthatók

A szerszámokat megtekintve látható, hogy a legnagyobb tönkremenetel az LCO₂ hűtés esetén történt, itt lényegében leszakadt az él a megmunkálás során. Az LCO₂+MQL kombináció során már lényegesen jobb a szerszám állapota, itt nagyobb kipattogzás és sarkoknál figyelhető meg. Ez annak az eredménye, hogy nem biztos, hogy az olaj eljutott a maró végéhez, vagy ha eljutott, akkor feltehető, hogy az olajrészecskék megfagytak és lepattoztak a szerszám éléről. A legjobb állapotban az emulziós hűtés során maradt a szerszám, ebben az esetben a forgácsolási zónában az élszakaszon az élradius növekedése megfigyelhető. A kísérletsor ezen eredményeiből arra lehet következtetni, hogy a kenésnek nagyobb hatása lehet a szerszámélettartamra, mint a hűtésnek. Ennek a megerősítésére további vizsgálatok szükségesek.

A forgácsolási kísérletek során keletkezett forgácsok a 16. ábrán láthatók.



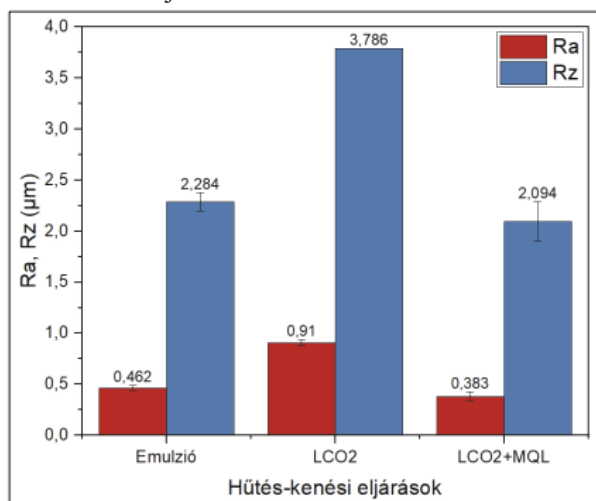
16. ábra Forgácsolási kísérletek során keletkezett forgácsok
a) LCO₂; b) LCO₂+MQL és c) Emulzió esetén



15. ábra Szerszámkopás jellegzetességei az egyes hűtés-kenési eljárások esetén
a) LCO₂; b) LCO₂+MQL; c) emulzió esetén

LCO₂ hűtésnél jellemzően 3...10 mm hosszúságú és 0,5...0,7 mm közelítő átmérőjű forgácsokat figyeltünk meg, elvélve találtunk kisebb darabokat. Ezzel szemben a folyékony szén-dioxid és minimálkenés együttes alkalmazásánál jelentősen jobb volt a forgácstörés, a forgácsok közelítő átmérője hasonló volt az előzőkhöz, azonban azok nagyobb részének hosszúsága jellemzően ~ 2 mm volt, számos kisebb darab is észlelhető volt, ami valószínűleg kapcsolatban van a ferde élű szerszám kisebb belépő élszakaszával. Emulziós hűtésnél a sima LCO₂-höz hasonló, bár azoknál hosszabb forgácsok jelentek meg. Az eredmények alapján megállapítható, hogy forgácstörés szempontjából az LCO₂+MQL hűtés-kenés volt a legjobb.

A hornyok talpfelületén mért felületi érdesség az egyes hűtés-kenési eljárások esetén a 17. ábrán látható



17. ábra A megmunkált hornyok talpfelületeinek átlagos felületi érdessége és érdességmagassága az egyes hűtés-kenési eljárások esetén

Mindhárom horony esetében háromszor végeztük el az érdességmérést és a kapott eredmények átlagát ábráztuk azok szórásaival. A diagramon látható, hogy a legjobb R_a és R_z értékeket LCO₂+MQL hűtő-kenő eljárás alkalmazásával sikerült elérni, ehhez közelítettek az emulziós hűtésnél tapasztaltak. A mért átlagos felületi érdesség és érdességmagasság értékek folyékony szén-dioxidos hűtés esetében voltak a legrosszabbak. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a kenésnek kiemelt szerepe van a horonymarás során, továbbá az LCO₂ hűtést minimálkenéssel kiegészítve jelentős javulás érhető el az emulziós hűtéshez képest is.

4. ÖSSZEGZÉS

Jelen publikációban bemutatásra került a Nikkel-bázisú szuperötvözetek megmunkálhatóságának problémaköre, s hogy miért oly nehezen forgácsolhatók ezek az anyagok. Ismertettük, mely tényezők vannak hatással a szerszáméltartamra, melyek közül kettőnek, a

szerszám pályáknak és a hűtés-kenési eljárásoknak hatásait saját kutatási példákön keresztül mutattuk be és vázoltuk a továbbfejlesztési lehetőségeket.

5. IRODALOM

- [1] Antolovich S. D.: Microstructural aspects of fatigue in Ni-base superalloys, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 373, No. 2038, (2015), doi:10.1098/RSTA.2014.0128
- [2] Pollock T. M., Tin S.: Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties, *Journal of propulsion and power*, Vol. 22, No. 2, (2012), pp. 361–374, doi:10.2514/1.18239
- [3] Olufayo O. A., Boulaares M. D., Songmene V.: Machining/machinability of Rene 65 superalloy for aerospace applications, in *Proceedings of 2020 IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies*, Capetown, South Africa, 2020, pp. 1–7.
- [4] Ulutan D., Ozel T.: Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review, *International Journal Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, No. 3, (2011), pp. 250–280, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2010.11.003.
- [5] CNC: Szuperötvözetek egykristályok – drágakövek a gázturbinákban, [online] Elérhető: <https://www.cnc.hu/2014/01/szuperotvoret-egykrystalok-dragakovek-a-gaszturbinakban> [Elérés dátuma: 2023. 02. 14.]
- [6] Rolls-Royce: Trent 800, [online] Elérhető: https://www.rolls-royce.com/products-and-services/civil-aerospace/widebody/trent-800.aspx# [Elérés dátuma: 2023. 02. 14.]
- [7] Rolls-Royce: The Rolls-Royce Trent Engine, [online] Elérhető: <https://slideplayer.com/slide/1603994/> [Elérés dátuma: 2023. 02. 14.]
- [8] Kodácsy J., Kovács Zs. F., Viharos Zs. J.: A Ni-BÁZISÚ SZUPERÖTVÖZETEK MEGMUNKÁLHATÓSÁGA HORONYMARÁSKOR, *Gradus*, Vol. 2, No. 2, (2015) pp. 142–146,
- [9] Kodácsy J., Viharos Zs. J., Kovács Zs. F.: A forgácsolhatóság meghatározásának módszerei Ni-bázisú szuperötvözetek horonymarásakor, *Gradus*, Vol. 15. No. 2, (2015) pp. 125-129,
- [10] Zhang B.-Y., Zeng Y.-N., Pang X.-Q., Li S.-Q., Liu X., Deng W.-J.: Feasibility analysis and process characteristics of selective laser ablation assisted milling Inconel 718, *Advances in Manufacturing*, Vol. 10, No. 4, (2022), pp. 495-519, doi:10.1007/s40436-021-00384-9

- [11] Sajjadi S. A., Nategh S., Guthrie R. I. L.: Study of microstructure and mechanical properties of high performance Ni-base superalloy GTD-111, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 325, No. 1-2, (2002) pp. 484–489, doi:10.1016/S0921-5093(01)01709-9
- [12] Singh A., Ghosh S., Aravindan S.: State of art for sustainable machining of nickel-based alloys using coated and uncoated tools and machining of high strength materials using surface modified cutting tools, *Tribology International*, Vol. 170, (2022), p. 107517, doi:10.1016/J.TRIBOINT.2022.107517
- [13] Szalóki I., Csuka S., Csesznok S., Sipos S.: CAN TROCHOIDAL MILLING BE IDEAL?, in *Manufacturing 2012 The XXI. Conference of GTE on Manufacturing and related technologies*, Budapest, Hungary, 2012.
- [14] Kónya G., Kovacs Zsolt F., Kókai E.: Milling of Nickel-based Superalloy by Trochoidal Strategies, in *2022 IEEE 22nd International Symposium on Computational Intelligence and Informatics and 8th IEEE International Conference on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Science and Robotics*, Budapest, Hungary, 2022, pp. 1–6.
- [15] Britannica: Cryogenics, [online] Elérhető: <https://www.britannica.com/science/cryogenics> [Elérés dátuma: 2023.02.14.]
- [16] Kumar G. H., Mohit H., Purohit R.: Effect of Deep Cryogenic Treatment on Composite Material for Automotive Ac System, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 2, (2017), pp. 3501–3505, doi:10.1016/J.MATPR.2017.02.240
- [17] Kale A., Khanna N.: A Review on Cryogenic Machining of Super Alloys Used in Aerospace Industry, *Procedia Manufacturing*, Vol. 7, (2017), pp. 191–197, doi:10.1016/J.PROMFG.2016.12.047
- [18] Deshpande S., Deshpande Y.: A review on cooling systems used in machining processes, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 18, (2019), pp. 5019–5031, doi:10.1016/J.MATPR.2019.07.496
- [19] Cordes S., Hübner F., Schaarschmidt T.: Next generation high performance cutting by use of carbon dioxide as cryogenics, *Procedia CIRP*, Vol. 14, (2014), pp. 401–405, doi:10.1016/J.PROCIR.2014.03.091
- [20] Braton N. R.: *Cryogen Properties and Processes*, in *Cryogenic Recycling and Processing*, Broken Sound Parkway, Florida: Talyer & Frances Group, 2018, pp. 39-55.
- [21] Jebaraj M., Pradeep K., Anduraj R.: Effect of LN2 and CO2 coolants in milling of 55NiCrMoV7 steel, *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 53, (2020), pp. 318–327, doi:10.1016/J.JMAPRO.2020.02.040
- [22] Kalsi N. S., Sehgal R., Sharma V. S.: Cryogenic Treatment of Tool Materials: A Review, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 25, No. 10, (2010), pp. 1077–1100, doi:10.1080/10426911003720862
- [23] Jacsó Á., Mátyási Gy., Szalay T.: Trochoidal Tool Path Planning Method for Slot Milling with Constant Cutter Engagement, *Advances in Industrial and Production Engineering: Select Proceedings of FLAME 2020.*, (2021) pp. 659–668, doi:10.1007/978-981-33-4320-7_59
- [24] Lovász Forgácsoló Kft.: Keményfém maró katalógus BZL001, [online] Elérhető: https://lovaszkft.hu/wpcontent/uploads/2021/01/Lo%v%C3%A1sz-BZL-katal%v%B3gus_21_2.pdf [Elérés dátuma: 2023.02.14.]

A TRANSZVERZÁLIS LAPRUGÓ NUMERIKUS MODELLEZÉSE ACÉL ANYAGGAL

NUMERICAL MODELLING OF TRANSVERSE SPRING LEAF WITH STEEL MATERIAL

Seif Eddine Habbachi¹, Attila Baksa², Marwen Habbachi³

¹Habbachi.seifeddine@enib.u-carthage.tn, National Engineering School of Bizerte (ENIB), Tunisia

²attila.baksa@uni-miskolc.hu, Institute of Applied Mechanics, University of Miskolc, Hungary

³marwen.habbachi@student.uni-miskolc.hu, Institute of Applied Mechanics, University of Miskolc, Hungary

ABSTRACT

Automobile suspension systems (springs, shock absorbers, linkages) are becoming more important in today's world! They contribute to a vehicle's handling, braking, protect the vehicle itself, and protect occupants, cargo or luggage from damage and wear. Furthermore, suspension systems have many functions, like preventing the vehicle body and frame from road shocks, giving it stability, and providing comfort as well. In the meantime, suspension equipment needs to have lower weight, maximum deflection, low maintenance, and a low operating cost. During this work, we will focus only on the leaf spring suspension, more precisely, the transverse leaf spring. Our project is a numerical modelling of a transverse leaf spring using the finite element method. We will investigate the maximum deflection and stress distribution along a deformable body, with two-common vertical and anti-metrical stiffnesses configurations. We will compare the results with a theoretical model and with data provided from the Iveco company, to validate them. Finally, an important comparison will be presented between the numerical results and the provided data. In fact, the results will show that the structure under the applied force is safe.

Keywords: Transverse leaf spring; Numerical analysis; Vertical stiffness; bump rubber; hyper-elastic model; Mooney-Rivlin solid, Automotive

1. Introduction

The importance of suspension systems in a commercial vehicle is one of the essential components in the automotive industry which needs continuous development and innovation to enhance productivity, improve existing properties, while minimizing energy (fuel) consumption. Replacing the conventional leaf spring with a transverse one is an objective for many automotive companies. In this case, the company, Iveco has proposed a new solution, to fabricate a leaf spring which can fulfill simultaneously, the absorption of the load (shock) and the role of the stabilizer bar. It is

difficult to adopt an advanced leaf spring using a composite material

for a transverse leaf spring in order to increase the performance of the material and minimize weight. The main factor in designing a new leaf spring, is material strain energy. R.B. Charde and D.V. Bhoje reported that spring deflection is a result of potential energy stored in the form of strain energy, due to loading and material elasticity. A leaf spring is usually made from carbon steel (plain), with a carbon percentage which varies between 0.9 and 1.0%. After the process of forming, it is followed by heat treatment of the material. This leads to better strength and greater material deflection. It enhances fatigue resistance that can cause material damage after a short cycle of work. The high cost of a vehicle (60 – 70%) is attributed to the material quality used and selected [1]. Results shows that composite leaf springs are better compared to the conventional leaf springs as reported in [2]. The authors also were able to use E-glass/Epoxy composite material to solve a major issue in the vehicle, providing lighter weight.

The aim of this research is to investigate a new product: A transverse leaf spring, for a specific client and compare the results obtained numerically, with analytic studies while verifying the resistance of the product under introduced loading.

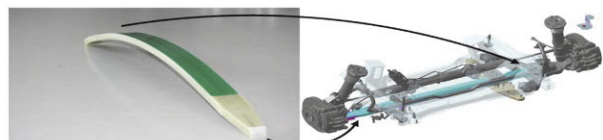


Figure 1 Example of a leaf spring and its integration in the suspension system

2. Modeling of transverse leaf spring

2.1. Material properties

- Leaf Spring

CATIA V5 was used to model the required parts, the leaf spring is made from high strength quench and tempering steel (51CrV4) which consists of carbon and other chemical elements as shown in Table 1 [3]. In order to

increase its mechanical properties especially the tensile strength (R_m) and the yield strength ($R_{p0.2}$), these leaves are subjected to heat treatment. The relationship between the strength and the true strain is illustrated as an elastoplastic behavior obtained after fracture tensile tests were done on three specimens, seen in Figure 2. The average value of the mechanical properties is shown in Table 2.

Table 1 Chemical composition of the steel grade (51CrV4)

		C%	Si %	Mn%	P%	S%	Cr%	V%	Al
52CrV4 (EN10089:2002)	Min	0.47	-	0.70	-	-	0.90	0.100	-
	Max	0.55	0.40	1.10	0.025	0.025	1.20	0.250	-
Present heat	-	0.52	0.34	0.98	0.014	0.009	1.06	0.12	0.025

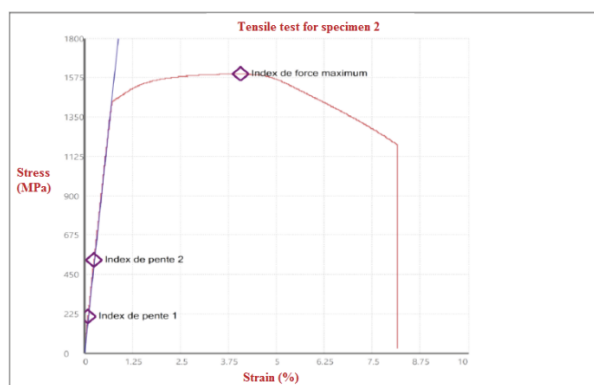


Figure 2 Tensile test curve of material (51CrV4)

Table 2 Mechanical properties of 51CrV4 material

Specimen	1	2	3	Average value
Ultimate tensile strength R_m (MPa)	1600	1595	1596	1597
Yield strength σ_y (MPa)	1472	1464	1466	1467
Elongation to fracture (A %)	12.43	12.50	11.93	12.29
Striction (Z %)	45.05	45.05	41.67	43.92

- Bump stop rubber buffer

Bump stops as shown in Figure 3, are vital and critical components of suspension systems in a vehicle, since they prevent its components from damaging over-compression, while eliminating harsh bottoming of the suspension, including the ones caused by vibration of the leaf springs.

In this instance they are modeled in Abaqus as a deformable body, while having a mechanical behavior different from the leaf spring. Classified as a rubber material, this material exhibits nonlinear mechanical properties and large deformations due to their complex molecular structure [4]. There are several laws such Neo-Hookean, Ogden, etc. But the Mooney-Rivlin solid law, [5] which is a special case of the generalized Rivlin model (called the polynomial hyper elastic model), illustrated in equation (1), was adopted to describe its behavior under loading. The strain energy for a two-parameter Mooney-Rivlin model of invariants scalar \bar{I}_1 and \bar{I}_2 of the left Cauchy-green deformation tensor \mathbf{b} is written in equation below.

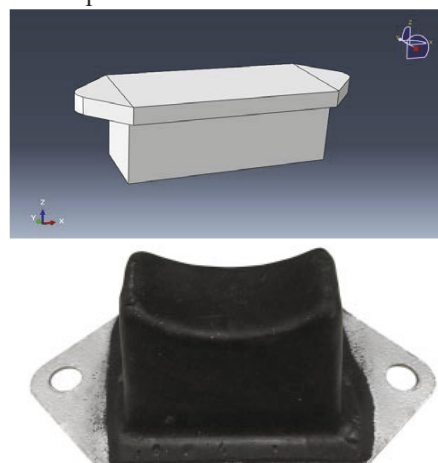


Figure 3 Elastomer bumper part

$$W = \sum_{p,q=0}^N C_{pq} (\bar{I}_1 - 3)^p (\bar{I}_2 - 3)^q + \sum_{m=1}^M \frac{1}{D_m} (J - 1)^{2m} \quad (1)$$

Where $C_{00} = 0$, C_{pq} are material constants related to the distortional response and D_m are material constants related to the volumetric response. For a compressible Mooney-Rivlin model, we have $N = 1$, $C_{01} = C_2$, $C_{11} = 0$, $C_{10} = C_1$, $M = 1$. So, it can be simplified to the equation (4).

$$W = \sum_{p,q=0}^N C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + C_{01} (\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1} (J - 1)^2 \quad (2)$$

from where C_{10} , C_{01} are material constants, $J = \frac{dv}{dv^0}$ is the Jacobian scalar (express the volume change in initial and current configuration of a body), \bar{I}_1 and \bar{I}_2 as described above, they are expressed as shown in equation (3) and (4) as a function of J and the first two scalar invariants I_1 , and I_2 of the left Cauchy-Green deformation tensor \mathbf{b}

$$\bar{I}_1 = J^{-\frac{2}{3}} I_1 \quad (3)$$

$$\bar{I}_2 = J^{-\frac{2}{3}} I_2 \quad (4)$$

There are many ways that we can identify Mooney-Rivlin constants such a tensile test. Suppose that the elastomer bumper is subjected only to radial stiffness. Using finite element analysis, we can easily identify these parameters based on the experimental data, which contains the

nominal stress and the nominal strain of the bushing material.

The Mooney-Rivlin Solid model parameters are shown in the Table 3.

Table 3 Mooney-Rivlin strain energy coefficients

C_{10}	C_{01}	D1
16.84	-8.42	0

2.2. Theoretical modeling

Analytically the leaf spring is modeled as a continuous beam with two supports [6]. Furthermore, the loading is applied symmetrically at both endpoints in a vertical stiffness configuration in figure 5 and anti-symmetrically in the anti-metrical stiffness case. Some hypotheses of beam theories must also be assumed:

- ✓ Euler-Bernoulli Hypothesis: The shape and geometry of cross-sections of a beam do not change in a significant manner under applied transverse loads. This means, that a cross-section can be assumed as a rigid surface during deformation and can only rotate.
- ✓ During deformation, the cross-section of the beam is assumed to remain planar and normal to the deformed axis of the beam.

❖ Vertical stiffness configuration

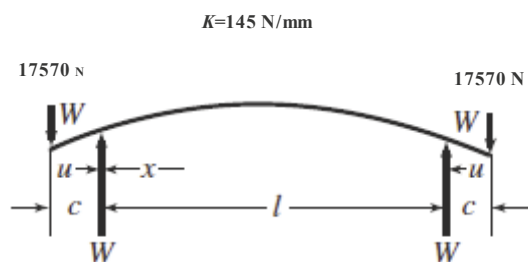


Figure 4 Vertical stiffness leaf spring (continuous beam)

Table 4 Results comparison in reference points

Point of application	Analytical deflection (mm)	Numerical deflection (mm)	Analytical stiffness (N/mm)	Numerical stiffness (N/mm)	Error (%)
RP-1	121.04	118.938	145	145.02	0.013
RP-2	121.04	119.04	145	144.89	0.075

To identify the equation of deflection on a leaf spring, we need to start with an equation (5). After integration of the equation and considering the initial conditions, we assume that the inertia is constant. We obtain the deflection on both the constant and the variable form section of the leaf spring, illustrated by equations (6) and (7), respectively. The numerical application value considers the applied force and the desired stiffness. The

table 1 presents a summary and comparison of the introduced results of two reference points.

$$\frac{EI}{du^2} = M(x) \quad (5)$$

Deflection on constant section form:

$$y = -\frac{Wcx}{2EI}(l-x) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} A.N \quad y &= -17570 * 282.5 \frac{800^2}{8 * 203000 * 28475} \\ &= -68.694 \text{ mm} \end{aligned}$$

Deflection on variable section form $y = \frac{Wc^2(2c+3l)}{6EI}$ (7)

$$\begin{aligned} A.N \quad y &= 17570 * (282.5)^2 \frac{(2 * 282.5 + 3 * 800)}{6 * 203000 * 28476} \\ &= 121.04 \text{ mm} \end{aligned}$$

The stress acting on the leaf spring is a bending stress which is introduced by the equation below.

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{M}{Z} = \frac{6Wl}{bt^2} \\ A.N \quad \sigma &= \frac{6 * 17570 * 310}{90 * 16^2} = 1418.41 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (8)$$

❖ Anti-metrical stiffness configuration

The second configuration is known by its shape in the form of letter S, it occurs when a vehicle is under a specific condition, where the motion of the two gears will be antisymmetric. In this case, the leaf spring fulfills at the same time, two functions one as suspension system and another as a stabilizing bar. Figure 6 is a graphic illustration of the described case; directing attention to the applied static force $F_{ST} + \Delta F$, $F_{ST} - \Delta F$ and the required stiffness to be satisfied.

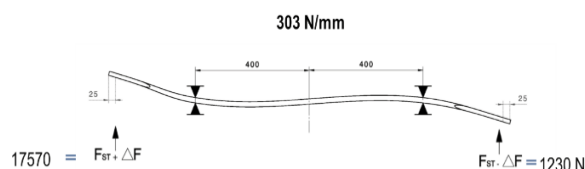


Figure 5 Anti-metrical Leaf spring (continuous beam)

2.3. Numerical modelling

To simulate how leaf springs behave under loading; it is an important to virtually simulate the problems of both configurations, transverse leaf springs which have Vertical Stiffness and Anti-metrical stiffness respectively. The model was carried out using the finite element software, Abaqus [7]. Some important assumptions were taken into account, such that the material is supposed to be isotropic and homogenous. Moreover, the leaf spring is considered to be under static loading. For the boundary condition in the first case, both limits of the surface of the elastomer bumper, were fixed as shown in Figure 7 ($U_x = U_y = U_z = 0$; $R_x = R_y =$

Rz = 0) during the simulation. The applied force on both reference points RP-1 and RP-2, belong to the leaf spring and is equal to 17570 N .

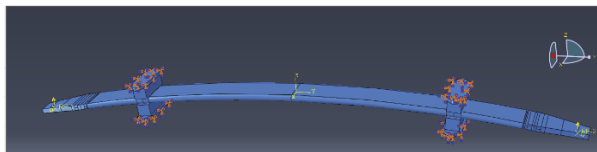


Figure 6 Vertical stiffness case Boundary conditions

The leaf spring is meshed using C3D8I with a solid continuous 3D element, with a linear approximation. However, the elastomer bumper was meshed using C3D8H element as a hyper-elastic material, as it was made of an elastomer material. Figure 8 shows the meshing for both parts.

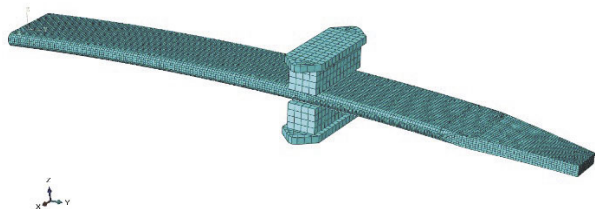


Figure 7 assembly mesh

2.4 Results

To proceed with the numerical results, we need to compare and validate the stiffness curve provided by Iveco, with the ones calculated on RP-1 and RP-2. As a result, a similarity between the two diagrams were found in Figure 9 and 10, and attains confidence on our subsequent results which provides a stiffness $K=145 \text{ N/mm}$

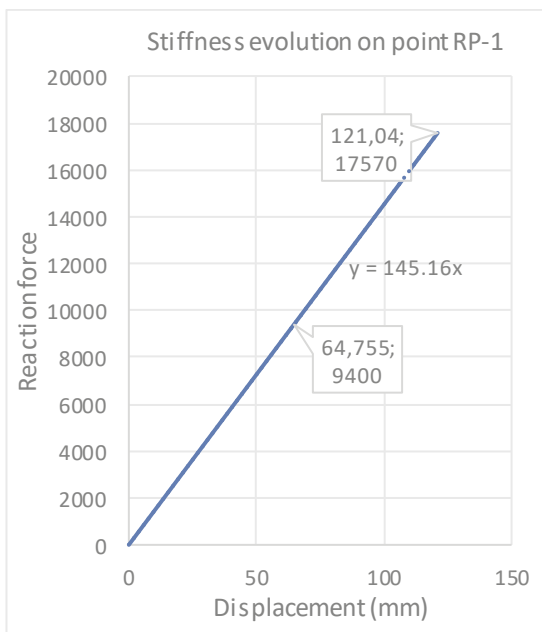


Figure 8 Numerical stiffness

Force-Displacement Diagram

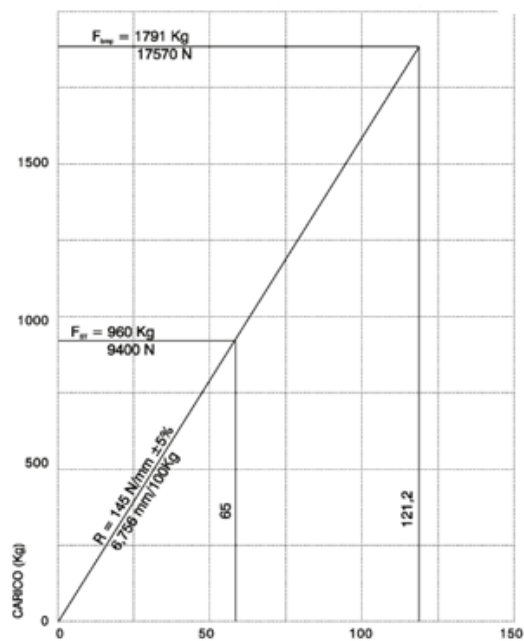


Figure 9 Experimental stiffness

To determine the developed stress, and the maximum deflection under the boundary conditions applied for both sets of configurations, vertical stiffness, and anti-metrical stiffness; results were shown below in Figure 11. As an interpretation for the first, we can say that the structure resists, since the numerical value of the maximum stress is below the limit stress that causes plastic deformation ($\sigma_{max} = 1351 \text{ MPa} \leq \sigma_y = 1467 \text{ MPa}$)

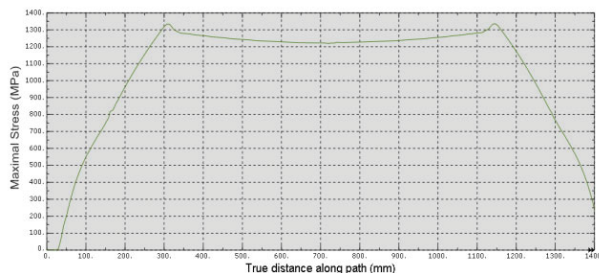


Figure 10 Stress distribution in Vertical stiffness case

The deflection curves provided with numerical analysis is very close to the one which was introduced before, by the equations (2) and (3). Figure 12 is an illustration of both results in the same graph.

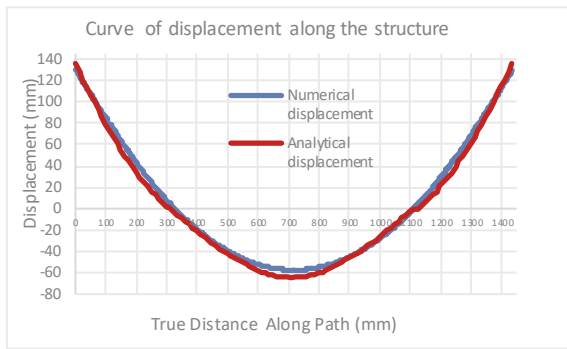


Figure 11 Analytical versus numerical deflection

As an interpretation for the second case, it is obvious that the maximum stress provided by the finite element method is set below the avoidance of the flowable stress, to cause plastic deformation. In other words, $\sigma_{max} = 1387 \text{ MPa} \leq \sigma_y = 1467 \text{ MPa}$. So, is the structure in this case as well:

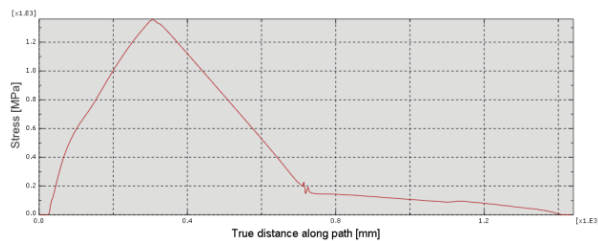


Figure 12 Stress distribution in anti-metrical stiffness case



Figure 13 Graphic visualization of stress distribution

3. Conclusion and further research

The numerical analysis of a 3D transverse leaf spring, under static loading, was investigated and a comparison between numerical, experimental, and analytical results were approved. It is worth to also to mention that further studies are needed to consider the dynamic effect during loading. However, to decrease energy consumption, a possibility of fabricating this type of leaf spring using a composite material, such E-glass / Epoxy material has been shown.

References

- [1] Mouleeswaran SENTHIL KUMAR, Sabapathy VIJAYARANGAN, “Analytical and Experimental studies on Fatigue Life Prediction of steel and composite Multileaf spring for Light Passenger Vehicles using Life Data Analysis” Materials science vol.13.No.2.2007.
- [2] S.A. Gebremeskel, Design, simulations, and prototyping of single composite leaf spring for light weight vehicles, Global J. Res. Eng. Mech. Mech. Eng. 12 (7) (2012) 21–30.
- [3] DIN EN 10089:2003-04, Hot rolled steels for quenched and tempered springs – Technical delivery conditions (2002).
- [4] Shariyat M, Khani Arani H (2022) Nonlinear interaction of the damped large dynamic deformations of the Mooney-Rivlin hyperelastic plates with the viscoelastic and shear reactions of the supporting substrate. Int J Non-Linear Mech.
- [5] Selvadurai, A. P. S., “Deflections of a Rubber Membrane,” Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 54, No. 6, pp. 1093-1119, 2006.
- [6] Chala Amsalu, Eneyw Gardie Damtie, Mechanical characterization, and comparison of stress-induced on mono and multi-leaf spring from laminated composite material, Results in Materials, Volume 16, 2022
- [7] AbaqusSoftware:<http://130.149.89.49:2080/v6.14/>

UNCERTAINTY ANALYSIS OF REPAIR WORK ESTIMATION BY MONTE-CARLO SIMULATION

JAVÍTÁSI MUNKAIGÉNY BECSLÉSÉNEK MONTE-CARLO SZIMULÁCIÓS BIZONYTALANSÁGI ELEMZÉSE

Pokorádi, László*

ABSTRACT

Maintenance is one of the most important territories of practical engineering. From a mathematical point of view, the operation of production equipment is a discrete state space stochastic process, without after-effects, i.e., a Markov-chain. The aim of this paper is to discuss the possibilities of using the Monte-Carlo Simulation of repair processes, to determine necessary maintenance capacity. The proposed method can be implemented for the assessment of the required maintenance capacity of a welding cell, depending on an allowable estimate of uncertainty.

KIVONAT

A karbantartás a gyakorlati mérnöki munka egyik legfontosabb területe. Matematikai szempontból a termelőberendezések üzemeltetése egy diszkrét állapotterben zajló, utóhatások nélküli sztochasztikus folyamat, más szóval Markov-lánc. A dolgozat célja, hogy megvitassa a javítási folyamatok Monte-Carlo szimulációja felhasználási lehetőségeinek bemutatása a szükséges karbantartási kapacitás meghatározására. A javasolt módszer alkalmazhatóságát egy hegesztőcella szükséges karbantartási kapacitásának meghatározásán keresztül mutatjuk be a megengedhető becslési bizonytalanság függvényében.

1. INTRODUCTION

Nowadays, there are numerous papers and books discussing new methods from different aspects to help maintenance management in decision making. For example, Dodu's article analyzed the causes which led to the lack of a availability of helicopters, while the rate of cannibalization and the number of unavailable spare parts increased [3].

One of the most important maintenance management questions is estimating the optimal maintenance capacity, which depends on the planned work performance (for example volume of production) [7] [11].

Balogh and Hanka discussed the applicability of

Bayesian methods to probabilistic risk assessment and engineering design problems [2]. Their proposed methodology is useful for engineering managers for rare event risk analysis in other applications and other disciplines.

The Monte-Carlo Simulation (MCS) is one of the classical simulation techniques. Metropolis and Ulam named this method Monte-Carlo [12] in 1949. But an early example of the same calculation, of the motion and collision of the molecules in gas, was described by Lord Kelvin in 1901 [6]. Kelvins' calculations were aimed at demonstrating the truth of the equipartition theorem for the internal energy of a classical system. The exponential growth in computer power is a well-known story, as is its impact: the increase in computational resources led to the rise of MCS techniques in the subject of engineering simulations. Hanka demonstrated that the Queuing theory, especially the finite queue model and the Monte-Carlo simulation method are suitable and efficient tools for describing the characteristics of electric vehicle charging stations [4]. His results help investigate the operation of existing charging stations and help to plan and construct new stations.

This paper proposes a Monte-Carlo Simulation-based method to determine one the one hand, the required maintenance capacity depending on a allowable estimating uncertainty and on the other hand, to determine what maintenance parameter has the greatest effect on the Required Repair Capacity.

The outline of the paper is as follows: Section 2 presents the estimation methodology of repair capacity. Section 3 details the Monte-Carlo Simulation, followed by Section 4, describing the proposed method through a case study. Section 5 summarizes the paper, outlines the prospective scientific work of the Author.

2. ESTIMATION OF NEEDED REPAIR CAPACITY

The necessary maintenance capacity can be determined by:

→ production performance T ;

* full professor, Óbuda University, Institute of Mechatronics and Vehicle Engineering

- failure rate λ ;
- repair work of one failure m .

The first parameter can be planned directly, while the other two are stochastic ones.

The failure rate $\lambda(t)$ can be thought of as the probability that one failure will occur in a given interval, assuming no failure before time t . The failure rate can be determined by the following equation:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{n}{N\Delta t} \quad (1)$$

where:

- n – number of failures during Δt interval;
- N – number of equipment;
- Δt – investigational performance interval (for example number of productions).

The failure rate λ of a given technical system changes stochastically, thus it has uncertainty. The failure rate can therefore be characterized as a random variable, which has an expected value, standard deviation, density $f(\lambda)$ and distribution function $F(\lambda)$.

To demonstrate it, Figure 1 shows a histogram of failure rates during operations of welding cells.

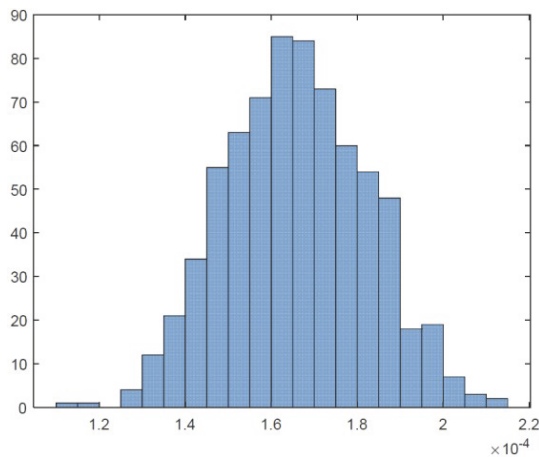


Figure 1. Histogram of Failure Rates of Welding Cells [1/Working Hour]

The repair work of one failure m is a stochastic one too. Therefore, it can be described to be its expectation, deviation, density $f(m)$ and distribution function $F(m)$.

Figure 2 shows a histogram of repair times of welding cells.

Based on the calculation indicated above, the required repair capacity per unit of working performance can be determined by the following equation

$$W_{unit} = m\lambda \quad (2)$$

and – knowing planned production performance – the total required repair capacity is

$$W_{total} = TW_{unit} \quad (3)$$

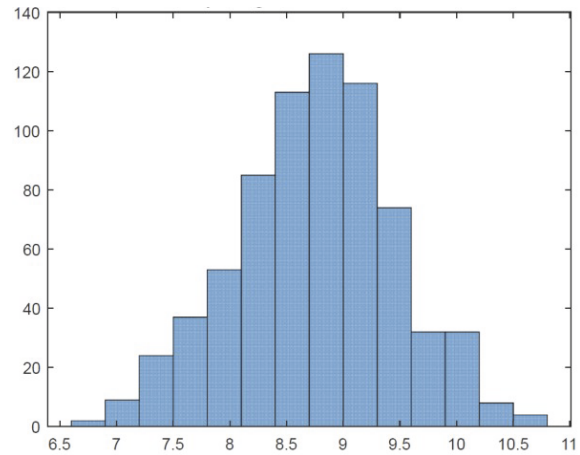


Figure 2. Histogram of Repair Works of Welding Cells [Working Hour]

3. THE MONTE-CARLO SIMULATION

At the core of MCS there is a computational procedure in which the performance measure is estimated using samples drawn randomly from a data set with appropriate statistical properties (see Figure 3.)

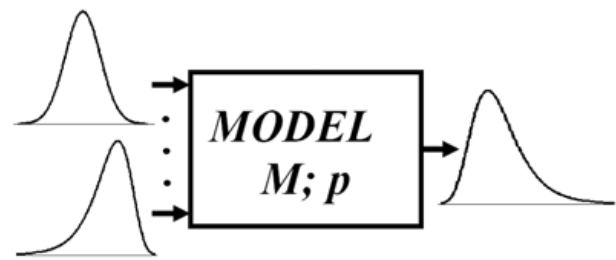


Figure 3. The Monte-Carlo Simulation (source: [8])

There are a number of books and papers on the theory of the MCS and its applications. Rubinstein offered a detailed treatment of the theoretical backgrounds and the statistical aspects of these methods in his book [12]. Dagpunar provided an introduction to the theory and practice of MC and Simulation methods [2]

The most common features of MCSs are as follows:

- {1} A known probability density function $f(x)$ over the set of system inputs.
- {2} Random sampling of inputs based on the distribution specified in feature {1}, and simulation of the system under the selected inputs.
- {3} Numerical aggregation of experimental data collected from multiple simulations conducted according to feature {2} [9].

Numerical experiments of MCS had led the modelers to run the simulation on many sampled inputs before they were able to infer the values of the system performance measures of interest. At its substance is a computational procedure in which a performance measure is estimated using samples drawn randomly from a population with appropriate statistical properties. The selection of samples, in turn, requires an appropriate random number generator.

Basically, three generation methods are used [10]:

- ✦ Inverse Transform Method (ITM);
- ✦ Composition Method (CM);
- ✦ Acceptance–Rejection Method (ARM).

The third is associated with John von Neumann and consists of sampling a random variant from an appropriate distribution and subjecting it to a test to determine whether or not it will be acceptable for use [6].

4. THE CASE STUDY

In this section, MCS of welding cells’ operational process will be carried out to determine the required repair work depending on estimation uncertainty. Based on the simulation results, theoretical and practical conclusions can be deduced for a maintenance management decision.

4.1. The Simulation

Firstly, the momentary failure rates and repair time data were analyzed statistically.

Due to the relatively small number of available data, the goodness-of-fit tests have been left out. According to general engineering practice it is assumed that the measured parameters have a normal (Gauss) probability distribution. The correlation between failure rates and repair times is less than 1%, thus it can be declared that they are independent. Table 1 shows the statistical analysis of data demonstrated by Figures 1 and 2.

Table 1. Statistical Data

	Failure Rate	Repair Work
Number of Samples	715	
Mean Value	$1.659 \cdot 10^{-4}$	8.773
Standard Deviation	$1.654 \cdot 10^{-5}$	0.739
Correlation	0.0097	

As the next step – using the determined input data and equation (2) above – the required repair capacity per unit of production performance should be defined.

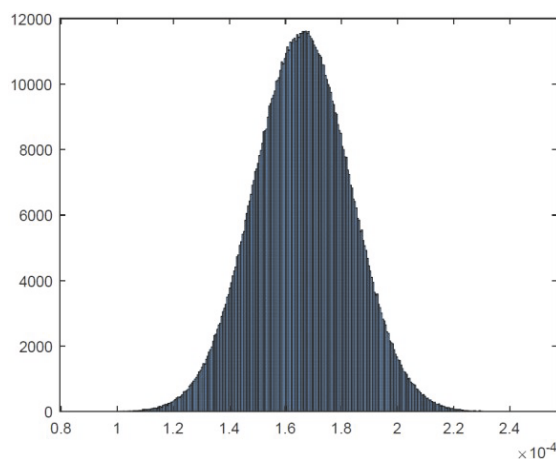


Figure 4. Histogram of Failure Rates [1/Working Hour]

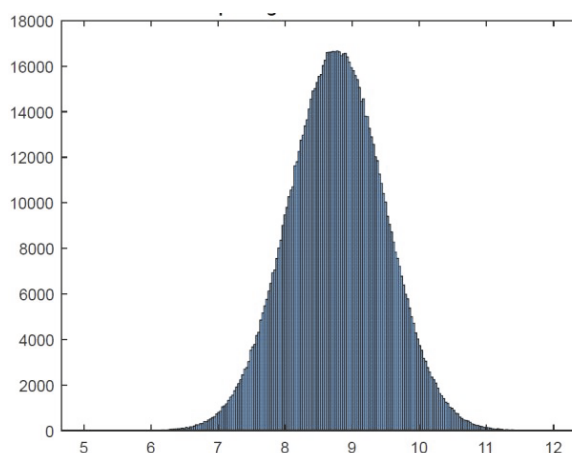


Figure 5. Histogram of Repair Work of one Failure [Working Hour]

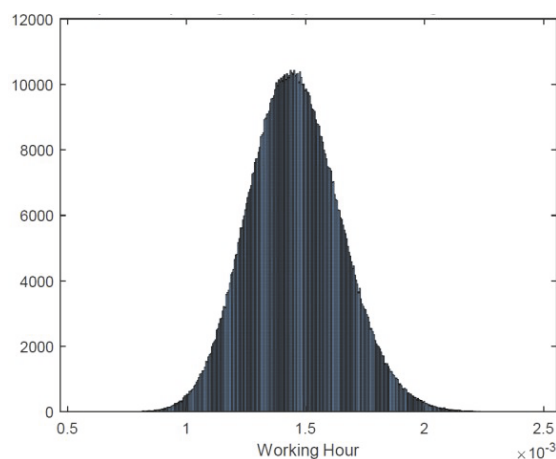


Figure 6. Histogram of Required Repair Capacity per Unit Production Performance [Working Hour]

The number of excitations was increased until the relative difference of results of the last two simulations fell below one thousandth. This excitation number is 1000000, which can provide sufficient statistical data,

such that correct conclusions can be drawn from the results of the simulations.

Figures 4 – 7 show the histograms of the simulations.

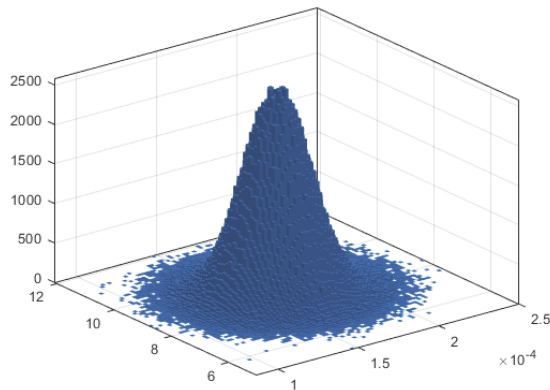


Figure 7. Three-dimensional Histogram of Required Repair Capacity per Unit Production Performance

Table 2 shows results of the simulation,

Table 2. The First Results of Simulation

		W_{unit}
Expected Value	m_{WU}	0.0015
Standard Deviation	s_{WU}	$1.9249 \cdot 10^{-4}$

4.2. Determination of Requested Repair Capacity

The results of model simulation can mainly be useful from the point of view of maintenance management. The most important question is the determination of Required Repair Capacity (RRC) depending on the required estimating uncertainty. This uncertainty indicates the probability that the planned repair capacity will not be sufficient for the occurred failures.

By applying the expected value and the standard deviation of the Required Repair Capacity per Unit Performance, – based on the standard normal distribution – Required Repair Capacity can be determined. For example, if the estimated uncertainty is 10%:

$$RRC = T(m_{WU} + 1.29s_{WU}) \quad (4)$$

Table 3. Required Repair Capacity

Estimating Uncertainty	RRC [Working Hour]
0.1	174.83121
0.05	181.76085
0.02	189.65294
0.01	195.04266
0.005	199.66242

In the case of 100000 productions' welding the RRCs are shown in Table 3.

4.3. Correlation Analysis

The results of the simulation can be used for correlation analysis of parameters. It can determine that the independent variable (in this case: failure rate and repair work of one failure) has the greatest effect on the output parameter (RRC).

The correlation coefficient characterizes the strength of stochastic interdependencies of the random variables [8].

The correlation coefficient $r_{\eta\mu}$ can be determined empirically by the equation:

$$r_{\eta\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \sum_{j=1}^n x_j \right) \left(y_i - \sum_{j=1}^n y_j \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \sum_{j=1}^n x_j \right)^2 \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^n y_j \right)^2}} \quad (5)$$

using the samples $x_1; x_2; \dots x_n$ and $y_1; y_2; \dots y_n$ which belong to the variables η and μ [8].

Table 4 shows the coefficients of Required Repair Capacity per Unit Performance.

Table 4. Correlation Coefficients

Correlation between W_{unit} and λ	0.7842
Correlation between W_{unit} and m	0.6159

Knowing the correlation coefficients, it can be said that the best way to improve the maintenance of the welding cell under test is by reducing the failure rate. This task should be solved by an engineering solution and not by "statistical corrections."

5. CONCLUSIONS

This paper discussed a Monte-Carlo Simulation-based method of repair process analysis. Its potential implementation was demonstrated by a case study. The following conclusions can be deduced from the results of modeling and analysis:

1. The proposed method can be used:
 - ✦ for analyzing of maintenance processes;
 - ✦ for supporting decision making in maintenance management;
 - ✦ for estimating the Requested Repair Capacity depending on the required estimating uncertainty;
 - ✦ to determine the input parameter that has the most effect on RRC.
2. The drawback of MCS is that its elapsed time increases significantly if the number of excitations rises (see Figure 8).

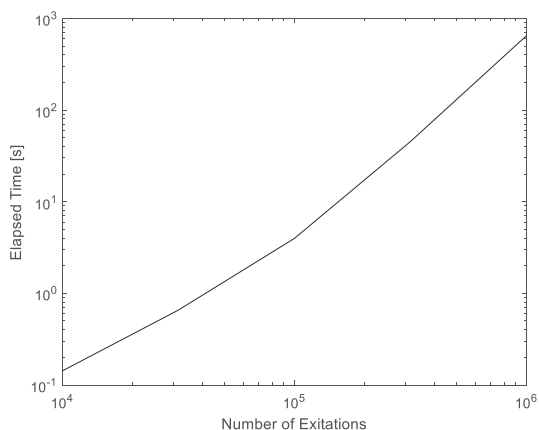


Figure 8. Elapsed Time of Monte-Carlo Simulation depends on Number of Excitations

The Author's planned prospective scientific research related to this field of applied mathematics and maintenance management decision making; includes the study of methodologies of mathematical tools for analysis of maintenance systems and processes, for example stochastic model and simulation-based sensitivity analysis of maintenance systems and processes.

6. REFERENCES

- [1] BALOGH Zs., HANKA L.: Bayesian Analysis in Risk Assessment, Application of Discrete Probability Distribution *Repüléstudományi Közlemények*, Vol. XX, No. 2, 2013, pp. 232-244 (in Hungarian)
- [2] DAGPUNAR J.S.: Simulation and Monte Carlo: With applications in finance and MCMC, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2007. ISBN: 978-0-470-06134-3
- [3] DODU P.E.: Simplified F.M.E.C.A. on Puma Helicopters, *Polytechnical Univerity of Bucharest. Scientific Bulletin, Series D, Mechanical Engineering*, Vol. 76, No. 2, 2014, pp. 49-60
- [4] HANKA L.: Application of the theory of stochastic processes and Monte-Carlo simulations for the analysis of the operation of charging stations for electric vehicles, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1237 paper 012002, 2022. pp. 1-16
- [5] KALOS M.H., WHITLOCK P.A.: Monte Carlo Methods. Second Edition. Weinheim: WILEY Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. ISBN: 978-3-527-40760-6
- [6] NEWMAN M.E.J., BARKEMA G.T.: Monte-Carlo Methods in Statistical Physics, New York: Oxford University Press Inc., 1999. ISBN: 9780198517979
- [7] POKORÁDI L.: Javítási munka igény becslése kétdimenziós normális eloszlással, *Gép*, Vol. 58, No. 12 (2007), pp. 24-28
- [8] POKORÁDI L.: Modellek a karbantartásban, *Gép* Vol.60, No 4-5 (2009), pp. 84-88
- [9] POKORÁDI L.: Monte-Carlo Simulation of Maintenance Processes, Proc oh the VSDIA 2016, Budapest, pp. 13-22
- [10] POKORÁDI L.: Availability assessment with MonteCarlo simulation of maintenance process model, *Polytechnical Univerity of Bucharest. Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, Vol. 78, No 3 (2016), pp. 43-54.
- [11] POKORÁDI L., GÁTI J.: Markovian Model-based Sensitivity Analysis of Maintenance System Proc. of SISY 2018, Subotica, pp. 117-121
- [12] RUBINSTEIN R.Y.: Simulation and the Monte-Carlo Method, New York: John Wiley & Sons, 1981. ISBN: 978-1-118-63216-1

A NANOFLUID ÁRAMLÁSÁNAK NUMERIKUS SZIMULÁLÁSA HULLÁLT CSATORNÁN KERESZTÜL ÖRVÉNYGENERÁTORRAL

NUMERICAL SIMULATION OF NANOFLUID FLOW THROUGH A CORRUGATED CHANNEL WITH VORTEX GENERATOR

Aimen TANOUGAST*, Krisztián HRICZÓ**

ABSTRACT

The radiator is an important part of a car. It cools the different parts of the vehicle by indirect heat exchange, by circulating coolant through the radiator. Heat transfer conditions are a function of the flow, geometry, and temperature characteristics. The present work concerns the numerical study of two-dimensional turbulent flow, with heat transfer in a corrugated channel with and without vortex generators, using Al₂O₃-water nanofluid as a heat transfer liquid.

The governing equations of the flow are the continuity equation, the momentum equation, and the energy equation modeling the heat transfer. This partial differential equation system was discretized and solved using the Ansys-Fluent commercial software based on the finite volume method. The standard k-ε model was used to model turbulence.

We analyzed the effect of parameters and the vortex generators on the solutions. The obtained results were presented graphically.

1. Introduction

An efficient heat exchange is often synonymous with increased performance, and the improvement of heat exchange in many industrial sectors requires the intensification of heat transfer by convection. To do this, a large number of researchers have conducted several numerical and experimental tests to increase the exchange surface. Others, on the other hand, have worked on heat transfer fluids, and the primary parameter that allows us to evaluate the potential of heat exchange is the thermal conductivity. The idea is then to disperse particles of nanometric size in the base fluid to increase its conductivity, hence the name of nanofluid. M. FIEBIG. [1] Published papers about the effect of Transverse and longitudinal vortex generators on heat transfer. Longitudinal vortices are more efficient for heat transfer enhancement than transverse vortices. Heat transfer enhancement increases with Reynolds number and increases for constant winglet aspect ratio with angle of attack up to a maximum angle of attack; but it

also increases up to limiting values for winglet height relative to transverse and streamwise winglet spacing and relative to boundary layer thickness.

S.Eiamsa-ard, P.Promvonge. [2] Have invested in an experimental study enhancement of heat transfer by means of helical tape inserts in a double pipe heat exchanger using cold water and hot air as the test fluids. Experimental results confirmed that enhanced heat transfer. The full-length helical tape with rod provides the highest heat transfer rate, about 10% better than that, without a rod. The pressure drop from the full-length helical tape insert decreases at low Reynolds numbers due to weak swirling flow but increases substantially at higher values of Reynolds numbers. The different free-spacing ratio value should be about unity for $Re < 4000$. The regularly spaced helical tape inserts at $s = 0.5$ yields the highest Nusselt number yield, which is about 50% above the plain tube.

M. Henze and all. [3] Have been experimentally investigated. The heat transfer and flow field using a transient method based on temperature measurement with thermochromic liquid crystals was used to obtain the heat transfer distribution behind a tetrahedral, full-body vortex generator. Turbulence promoters or vortex generators (VGs) are often used to manipulate the flow field and create turbulence. The heat transfer enhancement at different positions behind the VG is shown.

Veeranna Sridhara, Lakshmi Narayan Satapathy. [4] They published a review about nanofluids and the most important characteristics (kind and size of nanoparticles, volume fraction). These characteristics affect properties of the base fluid, increase the thermal conductivity, and viscosity. The Al₂O₃ nanoparticles varied in the range from 13 to 302 nm to prepare nanofluids, and the observed enhancement in the thermal conductivity was 2% to 36%.

S. R. Nfawa et al. [5] have numerically studied the turbulent flow in a trapezoidal corrugated channel with vortex generators for heat transfer enhancement. To achieve this objective, four amplitude heights were introduced: 1, 2, 3 and 4 mm. A constant heat flow is adopted as the thermal condition on the walls of the lower and upper corrugations, with a Reynolds number Re varying from 5000 to 17 500. The results found show, that in the case of the configurations with vortex

* PhD student, Institute of Mathematics, University of Miskolc

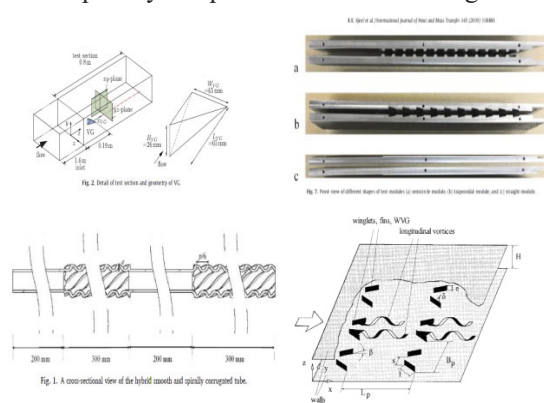
** associate professor, Institute of Mathematics, University of Miskolc

generators, a significant improvement of the Nu but accompanied by an increase of the friction coefficient is observed compared to the configuration without generators. Therefore, the vortex generator could be favorable in several heat transfer applications.

Raheem K. Ajeel and all. [6] They investigated the forced convective turbulent flow of SiO₂-water nanofluid through different corrugated channels being studied numerically and experimentally, using particle volume fractions (1% and 2%). The numerical results were close to the experimental results. It shows that the enhancement in heat transfer is due to corrugations and nanoparticles. The Nusselt number was increasing with Reynolds number. Corrugation creates a vortex, and the nanoparticles increase the conductivity of fluid, at the same time, the vortex and nanoparticles increase the friction, and this leads to a pressure drop.

Chen Yang and all. [7] Study the combination of the smooth part and the corrugated part, the effect of geometrical parameters on heat transfer, pressure loss; the heat transfer enhancement, while the maximum augmentation is found to be 258%. To evaluate the pressure loss of a hybrid, smooth, and spirally corrugated tube, the friction factor ratio is calculated with the comparison of smooth tubes. Results show that tube of the case with p/D ¼ 4.5 generates less pressure loss.

Filipe Neves and all. [8] Focuses on the numerical study of the performance of two nanofluids (Al₂O₃ water and TiO₂-water) in heat transfer by forced convection in a flat tube of an automobile radiator. Increasing the concentration of nanoparticles can improve the heat transfer characteristics of nanofluids. The use of alumina and titanium dioxide nanoparticles have a similar behavior regarding heat transfer. The utilization of nanofluids in the radiator of automobiles, enhances radiator performance, because the nanofluids can improve the processes related to heat transfer and consequently the performance of the engine.



1. figure some examples about corrugations and vortex generators

2. Mathematical formulation

The study of physical phenomenon is often formulated by laws expressed in the form of mathematical equations with partial derivatives which are elliptical and nonlinear on the one hand, and complex and coupled on the other hand, linking the various parameters, namely speed, pressure and temperature, which will be validated at each point of the field of study.

These equations obtained from the fundamental laws of mechanics and thermodynamics are:

- 1- The continuity equation, which translates the principle of conservation of mass.
- 2- The equations of Navier-Stokes which translate the principle of conservation of the quantity of movement.
- 3- The energy equation based on the first principle of thermodynamics.

2.1. General equations governing the flow

Simplifying assumptions

- An incompressible fluid ($\rho = \text{cte}$).
- A viscous Newtonian fluid ($\mu \neq 0$).
- Constant physical properties.
- Steady state ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$).
- 2D ($\frac{\partial}{\partial x_3} = 0$ and $U_3 = 0$).
- Negligible volume forces.
- Turbulent flow.

Taking into account these simplifying assumptions (e.g. [8]), the general equations governing the flow and heat transfer become:

2.1.1 Continuity equation

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \rightarrow \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

2.1.2- Equation of momentum

$$\frac{\partial(\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \bar{u}_i \bar{u}_j \right) \quad (5)$$

2.1.3 Energy equation

$$\frac{\partial(\rho C_p U_j \bar{T})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho C_p \overline{u_j \bar{T}} \right) \quad (6)$$

2.2 k-epsilon model

The k-epsilon model is a two-equation model that gives a general description of turbulence using two transport equations, one for turbulent kinetic energy (k) and the other for dissipation (epsilon). The turbulent dissipation is the rate at which velocity fluctuations dissipate. This model uses the Boussinesq concept, based on the analogy between the exchange of momentum by molecular interaction at the microscopic scale and the exchange of momentum by turbulence at the macroscopic scale. The k-ε model uses the gradient diffusion assumption to relate Reynolds stresses to mean velocity gradients and turbulent viscosity.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (7)$$

2.2.1 Turbulent kinetic energy transport equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial x_i} (\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (8)$$

2.2.2 Transport equation for the dissipation rate ε of turbulent kinetic energy

$$\frac{\partial \rho}{\partial x_i} (\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) G_k -$$

$$C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

$$G_k = -\rho \overline{U_i' U_j'} \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} = \rho \nu_t \left[\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right] \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} \quad (10)$$

2.3 Calculation of the thermo-physical properties of the nanofluid

The thermo-physical properties of the nano fluid AL_2O_3 are calculated from the following equations:

- Effective Density

$$\rho_{nf} = (1 - \Phi) \rho_f + \Phi \rho_p \quad (11)$$

- The volume fraction

$$\Phi = \frac{\text{solid volume nanoparticle}}{\text{total volume of the nanofluid}} = \frac{v_p}{v_f + v_p} \quad (12)$$

- Effective specific heat (Xuan and Roetzel correlation)

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \Phi) (\rho C_p)_f + \Phi (\rho C_p)_p \quad (13)$$

- Effective dynamic viscosity (Corcione correlation)

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_f} \right)^{-0.3} \Phi^{1.03}} \quad (14)$$

- Effective thermal conductivity (Maxwell's correlation)

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\Phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\Phi} \quad (15)$$

The properties are determined from the properties of water and the AL_2O_3 at 298 K, with a fraction $\Phi = 3\%$

1. Table. Thermo-physical properties of the base fluid water and the nanoparticle AL_2O_3 .

	Water	AL_2O_3
ρ (kg/m ³)	998.2	3600
C_p (J/kg.°K)	4182	765
K (W/m.°K)	0.6	36
μ (kg/m.s)	0.001003	-

2.4 Adimensional numbers

Reynolds Number:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D_h}{\mu} \quad (16)$$

Nusselt number:

$$Nu = \frac{h \cdot Lc}{\lambda} \quad (17)$$

Coefficient of friction:

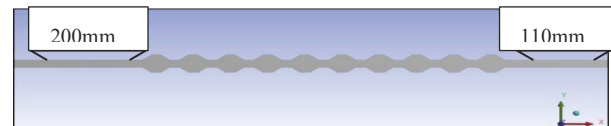
$$C_f = \frac{\tau_w}{0.5 \cdot \rho \cdot u^2} \quad (18)$$

Coefficient of thermal performance:

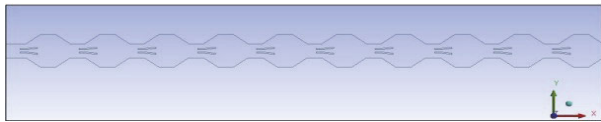
$$PEC = \frac{\left(\frac{Nu_{moy}}{Nu_{moy,ref}} \right)}{\left(\frac{f}{f_{ref}} \right)^{1/3}} \quad (19)$$

3. Numerical Modeling

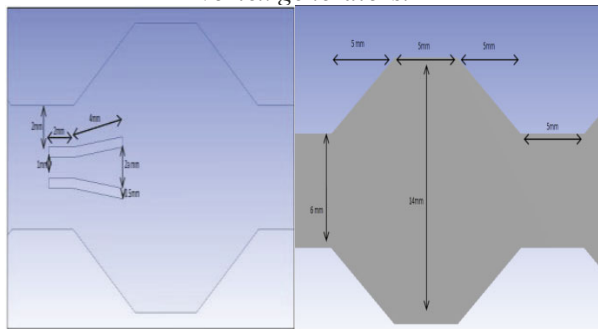
In the following, the different geometries, the generation of their mesh and the incorporation of boundary conditions as developed in the Ansys-Fluent preprocessor are described.



2. Figure Geometry without vortex generators.



3. Figure Central part showing the corrugations with vortex generators.



4. Figure Different dimensions on vortex generator and corrugation

The boundary types of the geometries considered in this work are summarized in the table below.

2. Table Types of boundaries.

Region	Type
Input	Velocity
Output	Pressure
Wall (smooth channel)	Adiabatic
Wall (corrugations)	Heat flow
Vortex generator	Adiabatic

4. Results and Discussion

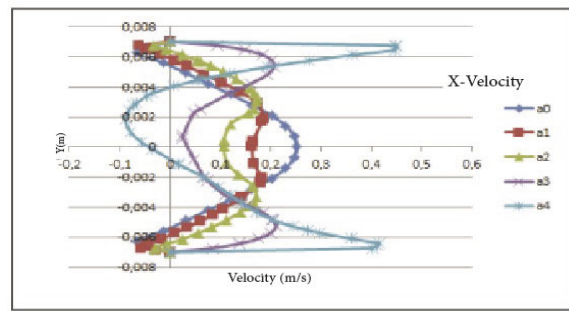
4.1 Effect of the Grid:

Figures (5) below, represent, the pressure and velocity profiles at a position $x=287.5\text{mm}$ and y vary from -7 to $+7\text{mm}$. The different curves were obtained with meshes made of 9141, 12883, 37191 and 55302 nodes for a Reynolds number of 17500.

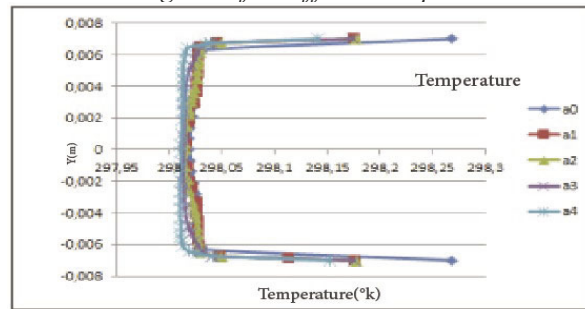
5. Figure Pressure and Velocity profile on a line at the 5th corrugation.

4.2 Numerical Simulation:

Figure (6) represents the velocity profile on a line from $[-7\text{mm}$ to $7\text{mm}]$ in the middle of the 5th corrugation with a vortex generator and this for different amplitudes. We notice that the velocity was parabolic in the middle and changes direction until it became negative under the effect of the vortex generator. Also, on figure (7), we notice that the temperature increases significantly with the increase of the amplitude.

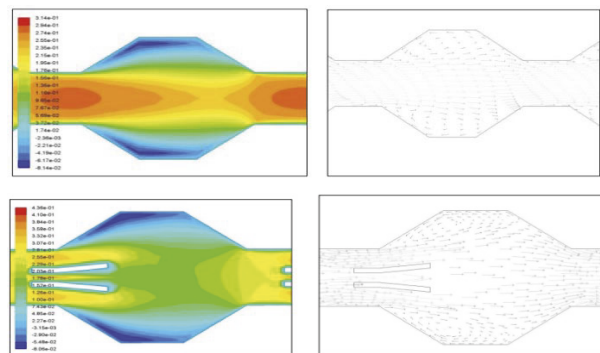


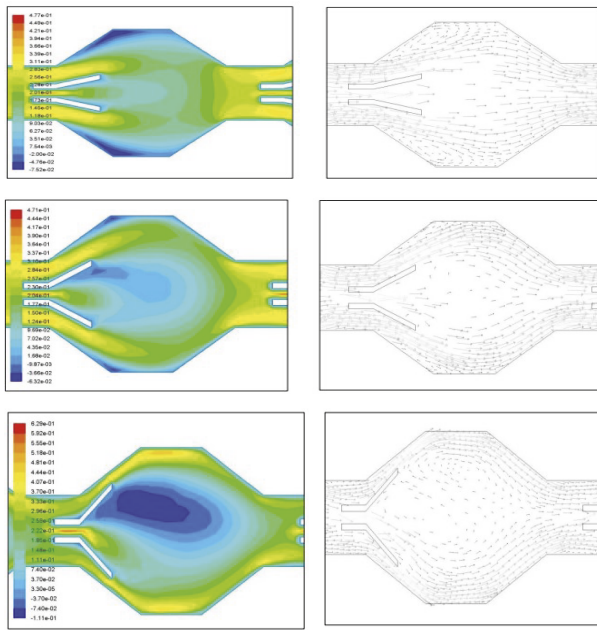
6. Figure Velocity profile on a line at the 5th corrugation for different amplitudes



7. Figure Temperature profile on a line at the 5th corrugation for different amplitudes

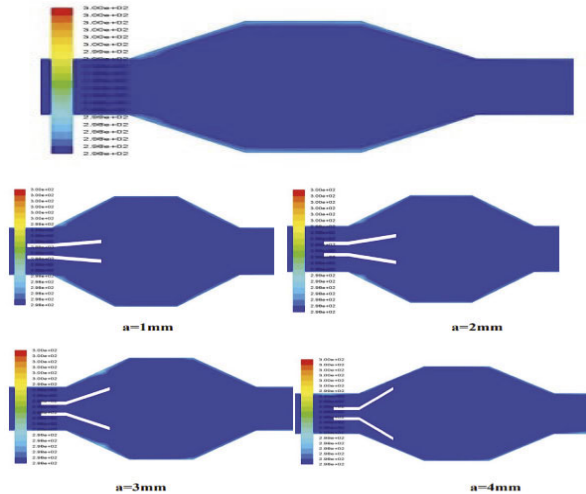
Figures (8) represent the contours and velocity vectors for a Reynolds number equal to 5000 with and without vortex generators. In the case of corrugations without vortex generators, an acceleration of the fluid is noted at the central section of the channel, and which weakens as one moves away from and towards the wall. On the other hand, in the case of corrugations with vortex generators, and each time the amplitude increases, there is elimination of the stagnation zone of the fluid at the wall, to go to concentrate in the middle. Moreover, this behavior is confirmed by the recirculation zones on the figures of the speed vectors. At the level of the upper and lower walls, the behavior is almost identical.





8. Figure Contour and velocity vector with and without vortex generators.

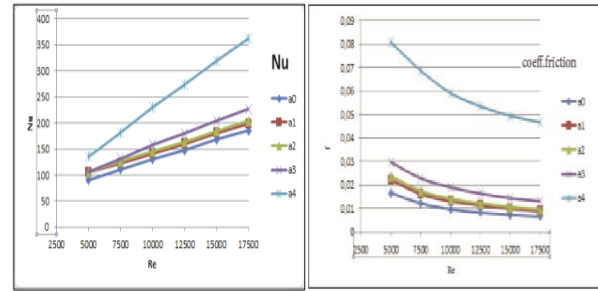
Figures (9) show the temperature contours for a Reynolds number of 5000 with and without vortex generators. It is clear that the vortex generators have a great influence on the temperature gradient in the walls; as the amplitude of the vortex generators increases, the thermal boundary layer becomes thinner and the heat transfer is better.



9. Figure Temperature contours ($Re=5000$)

Figures (10) represent, the variation of the Nusselt number and the friction coefficient as a function of the Reynolds number without and with vortex generators at different amplitudes. It can be seen that the Reynolds number and the amplitude have a significant influence on the Nusselt number. The latter increases with the increase of the amplitude, so the heat transfer is better. Also, the friction coefficient increases contrary to what

it should be because the velocity gradient is important at the wall.



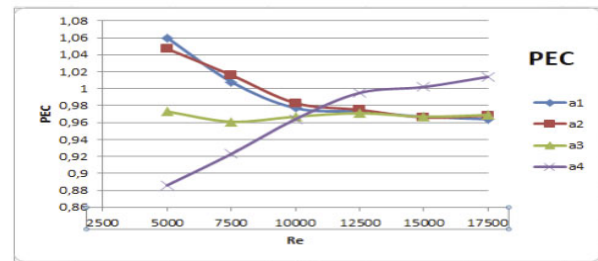
10. Figure Variation of the Nusselt number and friction coefficient as a function of the Reynolds number

Figure (11) represents the performance criterion PEC, which represents here the ratio of the Nusselt of the corrugations with the generator to that without the vortex generator to the friction of the corrugations with the generator to that without the vortex generator:

$$PEC = \frac{(N_{GV}/N_{SGV})}{(f_{GV}/f_{SGV})^{1/3}}$$

GV ; SGV : it mean with and without vortex generators respectively.

We notice that this factor increases with the increase of Reynolds number until reaching a value of 1 for an amplitude of 4mm, so it is an optimal amplitude which is chosen to pass to the second part of study, that of the nanofluid.



11. Figure Variation of the performance criterion as a function of the Reynolds number.

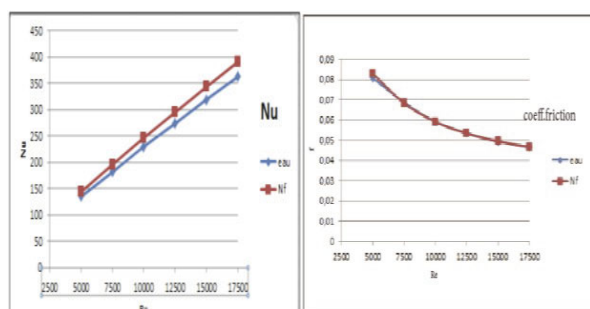
4.3 Comparison between: base fluid (water) and nanofluid (Al₂O₃ / water):

In the following results for the studied configuration with vortex generators (amplitude = 4 mm) using the base fluid (water), the nanofluid (Al₂O₃ / water) will be shown.

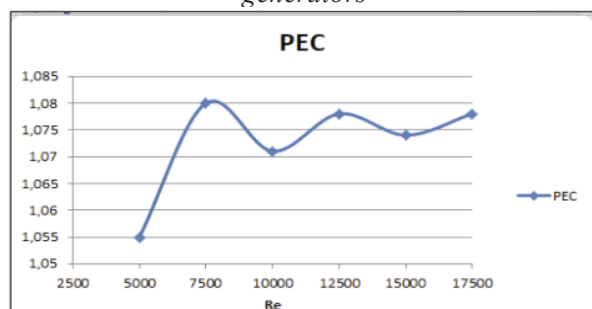
Figure (12;13) shows the variation of the Nusselt number, the friction coefficient as well as the performance criterion as a function of the Reynolds

number, with vortex generators. It can be seen that the Nusselt number increases significantly with increasing Reynolds number, with larger values for the Al₂O₃ / water nanofluid compared to pure water, which is in favor of improved heat transfer.

Moreover, the coefficient of friction results for both fluids used are identical, which means that nanoparticles have no effect on the coefficient of friction. Also, the PEC is around 1 (figure 13), which clearly shows that the nanofluid is much better than pure water, in favor of an improvement of the heat transfer.



12. Figure Variation of the Nusselt number and the friction coefficient as a function of Reynolds. For water and Al₂O₃ / water ($\phi = 3\%$) With vortex generators



13. Figure Variation of PEC as a function of Reynolds. With vortex generators

5. CONCLUSION

The numerical study of the turbulent flow of a nanofluid through a corrugated channel with a trapezoidal base with and without vortex generators was the objective of the present work.

Initially, the basic fluid flow (water) without vortex generators was studied and then the flow with vortex generators at different amplitudes was considered.

This study reveals:

- The effect of Reynolds number on the thermal and dynamic fields.
- The increase of the amplitude of the vortex generators leads to the increase in pressure.
- In the case of corrugations with vortex generators, each time the amplitude increases,

there is an elimination of the stagnation zone of the fluid at the wall, to be concentrated in the middle of the channel.

- As the amplitude of the vortex generators increases, the thermal boundary layer becomes thinner, and the heat transfer is better.
- The Reynolds number and the amplitude have a significant influence on the Nusselt number, but the friction coefficient increases contrary to what it should be.
- The PEC factor increases with increasing Reynolds number until it reaches a value of 1 for an optimal amplitude of 4mm.
- The Nusselt number values are higher for the Al₂O₃ / water nanofluid than for pure water.

The nanoparticles have no effect on the friction coefficient.

6. REFERENCES

- [1] M. FIEBIG. VORTICES, GENERATORS AND HEAT TRANSFER. Trans IChemE, Vol 76 18 September 1997.
- [2] S.Eiamsa-ard, P.Promvong. Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators. Solar Energy pages 483–494, 29 September 2004.
- [3] M. Henze , J. von Wolfersdorf, B. Weigand, C.F. Dietz, S.O. Neumann. Flow and heat transfer characteristics behind vortex generators – A benchmark dataset, International Journal of Heat and Fluid Flow pages 318–328. 14 July 2010.
- [4] Veeranna Sridhara, Lakshmi Narayan Satapathy. Al₂O₃-based nanofluids: a review. Nanoscale Research Letters 456, 16 July 2011.
- [5] S.R.Nfawa, A.R.A.Talib, S.U.Masuri, A.A.Basri, H.Hasini. Heat Transfer Enhancement in A Corrugated-Trapezoidal Channel Using Winglet Vortex Generators, CFD Letters 11, Issue 10, pages 69-80, 2019.
- [6] Raheem K. Ajeel, W.S.-I. Salim and all. Turbulent convective heat transfer of silica oxide nanofluid through corrugated channels: An experimental and numerical study. International Journal of Heat and Mass Transfer pages 145.28 September 2019.
- [7] Chen Yang and all. Thermohydraulic analysis of hybrid smooth and spirally corrugated tubes. International Journal of Thermal Sciences pages 158.2020.
- [8] Filipe Neves and all. Forced convection heat transfer of nanofluids in turbulent flow in a flat tube of an automobile radiator. Energy Reports pages 1185-1195, 19 July 2022.

ROBOTOK MUNKATERÜLETÉNEK ÉS SZERKEZETÉNEK TERVEZÉSE, ÁTTEKINTÉS

DESIGN OF ROBOT WORKSPACE AND STRUCTURE, A REVIEW

Bodnár Dávid*, Jármai Károly**

ABSTRACT

The use of robots for various tasks is growing. In order to identify possible research directions, this paper aims to review the progress achieved in the optimisation of workspace, lifetime and structure of robots in industrial or medical applications. Medical applications are considered because of the potential for improved accuracy and control and reduced invasiveness compared to traditional surgical methods. This review will form the basis for future research on the topic, identifying possible research directions using the algorithms and techniques reviewed. The focus is on workspace and structure optimisation, with an emphasis on cost-effectiveness.

ÖSSZEFOGLALÓ

A robotok alkalmazása különböző feladatokra folyamatosan növekszik. A lehetséges kutatási irányok azonosítása érdekében ez a tanulmány az ipari vagy orvosi alkalmazásokban alkalmazott robotok munkaterület-, élettartam- és szerkezetoptimalálásban elért eredményeket kívánja áttekinteni. Az orvosi alkalmazásokat azért vesszük figyelembe, mert a hagyományos műtéti módszerekhez képest javítható a pontosság és az irányítás, valamint csökkenthető az invazivitás. Ez az áttekintés a témával kapcsolatos jövőbeli kutatások alapját képezi, meghatározva a lehetséges kutatási irányokat az áttekintett algoritmusok és technikák felhasználásával. A hangsúly a munkaterület- és szerkezetoptimaláson van, a költséghatékonyság szem előtt tartásával.

1. SZERKEZETI TERVEZÉS ÉS OPTIMÁLÁS

A szerkezeti tervezés a robot kezdeti elrendezésétől függ. A különböző típusú robotokat gyakran különböző nevekkkel jelölik. Például Schönflies-motion [1], hibrid soros-párhuzamos [2], Tricept [3], Scara és Puma. Ezen manipulátorok széles skálájának szerkezeti tervezéséről és optimalásáról található tanulmányokat, a legelterjedtebb ipari robotkaroktól [4] az olyan speciális területeken használt robotokig, mint a minimálisan

invazív sebészet (MIS) [5] vagy a többszörös kötélhajtású űrrobotok [6].

Az evolúciós robotika is említésre méltó [7]; célja a robotok tervezési folyamatának automatizálása azáltal, hogy két fő komponensre bontja őket, egy testre, mint a hardver, és egy agyra, mint a vezérlő vagy szoftver.

Öt szabadsági fokú robotot lehet építeni az alap forgásának kombinálásával, három forgócsuklóval a karban egy forgócsuklóval a kar végénél [8].

A tervezési folyamat során strukturális optimalást alkalmaznak a kívánt tervezési célok elérése érdekében egy iteratív folyamat segítségével. Erre példa a [9] által bemutatott tervezési kihívás. Ez a cikk egy karcsú, három szabadsági fokú robotkart mutat be, amelyet szilárd hajtóanyagú rakétahajtóművek belső falának csiszolására használnak. Végeelem- és érzékenységelemzés felhasználásával szerkezetoptimalizáló alkalmazást fejlesztettek ki, 9,1%-os súlycsökkentést értek el. Az eredményeket a gyakorlati munkafolyamatok vizsgálati eredményeivel is összevetik.

Egy robot összekötő elemeinek topológia optimalása a lehető legrosszabb vagy a legnagyobb statikus terhelési feltételek kiszámításával végezhető el. Ezzel a módszerrel azonban a generált topológia nem lesz a lehető legjobb más szöghelyzetek esetén, mivel az a számításokhoz használt normalizált terheléstől függ. A [10] a statikus terhelési technikára épülő módszert javasol. Ez a megközelítés több kedvező topológiát számol ki különböző pozíciókhoz, majd a paraméterek szabványosítása és újrászámítása után több szöghelyzethez optimális könnyű topológiát kap.

A robottervezési folyamat lépései Jorge Angeles és Frank C. Park a Springer Handbook of Robotics (2008) [11] című könyvében foglaltak szerint hat szakaszból állnak:

1. A topológia meghatározása. Ez egy kinematikai lánc, amelyet a mechanikai szerkezet paraméterei adnak meg. Kiválasztjuk a robot típusát: soros, párhuzamos vagy hibrid. Az csuklók típusát is eldöntik, a leggyakrabban alkalmazott a forgó és a prizmatikus csukló.

2. Meghatározzuk a geometriai méreteket. Ez a lépés lehetővé teszi a tervező számára, hogy megkapja az ízületek jellemző paramétereit, és ez adja meg a szükséges információkat a robot munkaterületének meghatározásához is. Az ízületi elemek paraméterei is

* mérnök, Emerson Automation FCP Kft. Eger, PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

ebben a lépésben szerepelnek, ami nem befolyásolja az architektúrát, de korlátozhatja a mozgási képességet, és ezzel együtt a maximálisan elérhető munkaterületet.

3. A kapcsolatok és az ízületek méretezése a statikus terhelési követelményekhez. A számítás során az erők és a nyomatékok is szerepelnek.

4. A láncszemek és csuklók méretezése a dinamikus terhelési követelményekhez. A dinamikus terhelések a mozgó ízületekből és a manipulált tárgyból származó tehetetlenségi hatások.

5. Az elasztodinamikai méretezés meghatározása. Ezt a teljes mechanikai szerkezetre vonatkozóan kell elvégezni, hogy elkerülhetők legyenek a teljesítményt csökkentő frekvenciák. A működtető elemek dinamikája ennek a méretezésnek a részét képezi.

6. Válassza ki a működtetőelemeket. Válassza ki a működtetőelemek teljesítményátvitelének módját.

Könnyen belátható, hogy ha ezeket a lépéseket követjük, és egymás után végezzük el, akkor olyan robotot tervezhetünk, amely képes a tervezett feladatok elvégzésére. Egy összetett rendszer optimalizálása nehéz feladat, de a tervezési lépések egymás utáni optimalizálásával optimális tervezés érhető el. Például a robotkar egyik láncszemének optimalizálása lehetővé teszi a tervező számára, hogy kisebb motort válasszon, és így több paramétert javítson.

Természetesen a tervezési folyamat befejezése után szükség van a teljesítmény értékelésére. Ez elvégezhető akár a fent bemutatott alulról felfelé, akár az ellenkezőjét, a felülről lefelé megközelítést alkalmazva készült a terv. A felülről lefelé irányuló megközelítésben a robot már adott, és a feladat az optimális feladatelhelyezés meghatározása az adott munkaterületen. Ezt az elhelyezési döntést az adott manipulátor ügyessége korlátozza. A kezűgyesség értéke nagyobb, ha a lehetséges testtartás-variációk nagyobbak. Ez az érték a munkaterület kiválasztott pontjához van kötve [12].

2. MUNKATER

A munkaterület, amelyet egy robot elérhet, döntő fontosságú téma. A gyakorlatban, ha a munkaterület túl kicsi, a robot alkalmatlan a tervezett feladatra. Ha azonban a munkaterületet nem használják ki, az veszteségnek tekinthető, mert egy kisebb robot is elegendő lenne. Az egyik megközelítés az, hogy a semmiből kell kifejleszteni egy célzottan erre a célra épített robotot. A hajók kettős héjazatú szerkezetében hegesztő robotot a kinematikai változók tekintetében optimalizálni lehet, hogy a kívánt funkciókat kielégítse. A [13] című tanulmány egy feladatorientált munkaterület segítségével mutatja be a tervezési folyamatot. A szükséges forgási szöveket a hegesztés során bejárando útvonal ismeretében határozzuk meg. Ez felhasználható a kinematikai változók kiszámításához.

A mechanikai szerkezet pontos és optimális számítása kulcsfontosságú téma, mivel ez a kezdeti tervezés része, és a gyártás után a geometria véglegesnek tekinthető. A robotokat úgy tervezik és építik, hogy előre meghatározott feladatokat hajtsanak végre. A legjobb, ha ezeket a követelményeket már a magas szintű korai tervezési fázisban lefedjük, hogy garantáljuk, hogy a végső specifikáció optimális legyen az előre meghatározott pozíciók, a kívánt orientációk és a mozgékonyág szempontjából [14].

Az optimalizáláshoz számos különböző megközelítés létezik, a [15]-ben az *Escherichia coli* (*E. Coli*) baktériumok táplálékkereső viselkedésén alapuló evolúciós optimalizációs algoritmust mutatnak be. Ez az organizmus az emberi bélben van jelen, és újszerű módon keresi a tápanyagokat. Kétféle mozgástípussal rendelkezik: egy alacsony energiájú "úszás" módszerrel a kívánt cél eléréséhez és egy nagy energiájú "bukdácsló" mozgással véletlenszerű irányokban. Az utóbbi mozgás több energiába kerül, de nagyobb eséllyel talál új tápanyagfoltokat. Maga a táplálékkeresés folyamata, amely az optimalizálás módszerét adja, négy folyamatra magyarázható:

1. Kemotaxis: Ez a baktériumokra jellemző mozgás, a kis energiájú "úszás" és a nagy energiájú "bukdácsló" mozgás együttesen. Az úszás esetében a mozgás hossza előre meghatározott, a bukducslás esetében pedig a mozgás iránya és amplitúdója véletlenszerű.

2. Rajzás: Ez a viselkedés biztosítja, hogy a baktériumok a kemotaxis fázisban együtt maradjanak. Ez egy adott optimalizációs feladatra a lehető legjobb megoldás megtalálásának analógja.

3. Szaporodás: A baktériumok egy lehetséges megoldás megtalálása után két csoportra oszlanak. Az "egészségesebb" rész felváltja a másik részt. Ezt az előre meghatározott fitnessfüggvény diktálja.

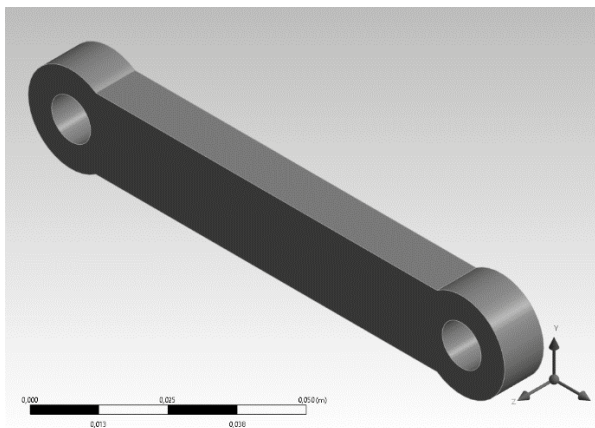
4. Elimináció és szétszóródás: Ez a lépés biztosítja, hogy a megtalált megoldás a lehető legjobb megoldás legyen. Egy előre nem látható esemény megzavarhatja az algoritmust, például egy másik kiindulási pont vizsgálata. Ez segít csökkenteni a stagnálást és kiküszöbölni a lokális optimumpont körüli lebegést.

3. OPTIMÁLÁS ANSYS 2022 R2-BEN

Az optimalizációs feladat az Ansys 2022 R2 Academic Version-ban rendelkezésre álló közvetlen optimalizációs módszert értékeli. A választott munkadarab egyszerű, mindkét végén rögzítési pontokkal. Ezeket parametrikusan szimmetrikusra korlátozzuk, és a munkadarab is szimmetrikus a ZX síkhoz képest, ahogy az 1. ábrán látható. A munkát a Static Structural és a Direct Optimization komponensekkel végezzük.

A modell az Ansys DesignModeler programban készült. Ez lehetővé teszi a felhasználó számára, hogy a parametrikus modellt építsen. A modellre vonatkozó valamennyi dimenzió kiválasztható az optimálás paramétereiként. Ebben a példában 5 darab paraméter lett létrehozva. Ezek a paraméterek a rögzítési pontokra, anyagvastagságra és a súlyra vonatkoznak:

1. "D18" - a rögzítőszem belső átmérője
2. "D20" - a rögzítőszem külső átmérője
3. "L23" - a gerenda magassága az Y tengelyen.
4. "E" - az alkatrész extrudálási szélessége
5. Az alkatrész tömege



1. ábra A munkadarab parametrikus modellje

A következő lépés a végelem vizsgálat beállítása, és itt a teljes deformációra került kiválasztásra. A paraméterek kijelölése után a programban automatikusan létrejön a Paraméterek sor. A Direct Optimization modul beillesztése után az eredetileg kiválasztott paraméterek jelennek meg a modulban. A célkitűzéseket és a kényszereket még be kell állítani. Két célkitűzés került optimálásra egyidejűleg. A cél a szilárd tömeg és a teljes deformáció maximumának egyidejű minimalizálása volt. A terhelést a számítások során állandó értéken tartjuk.

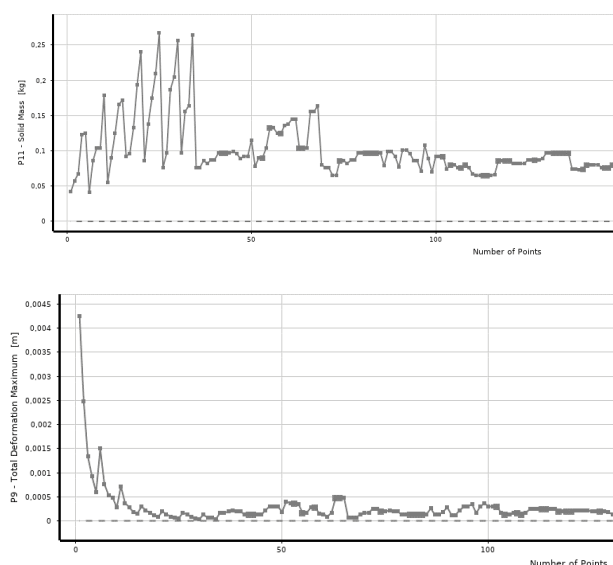
Az optimálási módszer, a program által leírtak szerint: "Az adaptív többcélú módszer a népszerű NSGA-II (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II) egy változata, amely a kontrollált elitizmus koncepcióján alapul. Több célt és korlátozást támogat, és célja a globális optimum megtalálása. Folyamatos és gyártható bemeneti paraméterekre korlátozódik".

A genetikai algoritmusok alkalmazhatóak egycélú optimálási problémákra. Számos probléma esetén azonban több célfüggvény optimálására van szükség. Ezt úgy lehet megtenni, hogy a több függvényt egyetlen skalár fitnessfüggvénybe kombináljuk, amelyet az egycélú genetikai algoritmus megold. Ez az optimálás az összes célfüggvény lehetséges kompromisszumainak megtalálására irányul. Ezek általában ellentmondások. Emiatt többféle megoldás jelenik meg [16]. Az Ansys például 3 lehetséges megoldást mutat a megadott célokra.

A Kalyanmoy, Agrawal et al. által javasolt NSGA-II [17] az Ansys által használt adaptív többcélú módszer alapja. Az algoritmus egy véletlenszerűen generált pontthalmazt használ kiindulási pontként, amelyet populációnak nevezünk. E populáció első tagját összevetik az összes többi taggal, és "dominálnak" tekintik, ha a fitnessfüggvény szerint bármely más megoldás jobb. Ha ez megtörténik, ez a megoldás kikerül a populációból. Az első ellenőrzés után csak egy tag marad; ez az első megoldásjelölt. A második, véletlenszerűen mutált generáció minden egyes tagját ezzel a megoldással összevetve ellenőrzik. A harmadik generációt az előző generációk két legjobb megoldásával összevetve ellenőrzik. Ez egy ésszerű megközelítés sok lehetséges megoldás gyors kiszámításához. Ebben az esetben összesen 143 tervezési pontot generált, 34 kezdeti mintával.

A 3. ábra a Solid mass paraméter változását mutatja az optimalizáló algoritmus lefutása során. Az első pontok esetében kiszámíthatatlan változások tapasztalhatók; körülbelül 30 pontnál a változás lelassul. A többcélú optimálási módszer miatt a többi paramétert is egyszerre ellenőrzi a program. Ezért ez a paraméter nem mutat egyenes csökkenést. Az algoritmus 7 generáció után konvergált, ami az a láptelmélettel beállítást. Az alábbi ábrán a piros pontok a számítás során használt egyedi tervezési pontokat jelölik. A válaszfelület részét képező pontokra automatikusan egy további négyzetes jelölő kerül.

Egy megoldás akkor tekinthető a válaszfelület részének, ha az értékváltozás minimális a következő ponthoz képest. A 2. ábrát tekintve csak az azonos értéket követő pontokon vannak négyzetek. Az, hogy egy tervezési pont is a válaszfelület része, azt jelzi, hogy az egy lokális minimum. Az végső súlymegtakarítás 9,03%.



2. ábra A súly és teljes deformáció változása

3. ÖSSZEGRZÉS

Ebben a rövid áttekintésben a robotmanipulátorok különböző feladatokhoz való felhasználását vizsgáljuk. A lehetséges kutatási irányok a zonosítása érdekében ez a cikk áttekintette az ipari vagy orvosi alkalmazásokban használt robotok munkaterület-, élettartam- és szerkezetoptimalálásában elért eredményeket. Az orvosi alkalmazásokra vonatkozó szakirodalom nem könnyen hozzáférhető, de az optimalás hasonlóan elvégezhető. A megfelelő paraméterek megválasztásával jobb pontosság és irányíthatóság érhető el. Ez az áttekintés a témával kapcsolatos jövőbeli kutatások alapját képezi, meghatározva a lehetséges kutatási irányokat az áttekintett algoritmusok és technikák felhasználásával. Egy egyszerű optimalási feladat bizonyítja, hogy az Ansys 2022 R2 Academic verzióban funkcionális, könnyen használható, kifejezetten az optimalásra vonatkozó modulok állnak rendelkezésre. A kutatás következő lépése a szerkezeti kialakítás optimalása, valamint a különböző gyártási módszerek és azok hatásának vizsgálata a robot könnyű gyárthatóságára, gazdaságosságára, merevségére és ügyességére.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal - NKFIH támogatta a K 134358 számú projekt keretében.

5. IRODALOM

- [1] G. Wu, S. Bai, P. Hjørnet, Architecture optimisation of a parallel Schönflies-motion robot for pick-and-place applications in a predefined workspace, *Mech Mach Theory*. 106 (2016) 148–165. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2016.09.005
- [2] Y. Zhao, J. Mei, Y. Jin, W. Niu, A new hierarchical approach for the optimal design of a 5-dof hybrid serial-parallel kinematic machine, *Mech Mach Theory*. 156 (2021) 104160. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2020.104160
- [3] M.A. Hosseini, H.M. Daniali, Cartesian workspace optimisation of Tricept parallel manipulator with machining application, *Robotica*. 33 (2015) 1948–1957. doi:10.1017/S0263574714000861
- [4] S.A. Kouritem, M.I. Abouheaf, N. Nahas, M. Hassan, A multiobjective optimisation design of industrial robot arms, *Alexandria Engineering Journal*. 61 (2022) 12847–12867, doi:10.1016/j.aej.2022.06.052
- [5] J. Li, S. Wang, X. Wang, C. He, Optimization of a novel mechanism for a minimally invasive surgery robot., *Int J Med Robot*. 6 (2010) 83–90. doi:10.1002/res.293
- [6] J. PENG, H. WU, T. LIU, Y. HAN, Workspace, stiffness analysis and design optimisation of coupled active-passive multilink cable-driven space robots for on-orbit services, *Chinese Journal of Aeronautics*. (2022), doi:10.1016/j.cja.2022.03.001
- [7] F. van Diggelen, E. Ferrante, A.E. Eiben, Comparing lifetime learning methods for morphologically evolving robots, (2022). doi:10.48550/arXiv.2203.03967
- [8] G. Shanmugasundar, R. Sivaramakrishnan, S. Meganathan, S. Balasubramani, Structural Optimization of a Five Degrees of Freedom (T-3R-T) Robot Manipulator Using Finite Element Analysis, *Mater Today Proc*. 16 (2019) 1325–1332. doi:10.1016/j.matpr.2019.05.231
- [9] Z. Luo, X. Zhao, L. Liang, F. Wang, Structural optimisation of slender robot arm based on sensitivity analysis, *Math Probl Eng*. 2012 (2012). doi:10.1155/2012/806815
- [10] G. Lakshmi Srinivas, A. Javed, Topology optimisation of rigid-links for industrial manipulator considering dynamic loading conditions, *Mech Mach Theory*. 153 (2020) 103979. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2020.103979
- [11] K. Siciliano, J. Angeles, F.C. Park, *Springer Handbook of Robotics*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008. doi:10.1007/978-3-540-30301-5
- [12] Tanev, Tanio & Stoyanov, B.. (2000). On the Performance Indexes for Robot Manipulators. *Problems of Engineering Cybernetics and Robotics*. No.49. 64-71.
- [13] D. Lee, T. Seo, J. Kim, Optimal design and workspace analysis of a mobile welding robot with a 3P3R serial manipulator, *Rob Auton Syst*. 59 (2011) 813–826. doi:10.1016/j.robot.2011.06.004
- [14] S. Patel, T. Sobh, Goal directed design of serial robotic manipulators. *Proceedings of the 2014 Zone 1 Conference of the American Society for Engineering Education*, IEEE, 2014: pp. 1–6. doi:10.1109/ASEEZone1.2014.6820684
- [15] S. Panda, D. Mishra, B.B. Biswal, Revolute manipulator workspace optimisation: A comparative study, *Applied Soft Computing Journal*. 13 (2013) 899–910. doi:10.1016/j.asoc.2012.09.009
- [16] T. Murata, H. Ishibuchi, MOGA: multiobjective genetic algorithms, in: *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, IEEE, n.d.: p. 289. doi:10.1109/ICEC.1995.489161
- [17] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 6 (2002) 182–197. doi:10.1109/4235.996017

CONTENTS

1. Péter Bozzay, Prof. Dr. Károly Jármai, Dr. Zoltán Virág:

VIBRATION DAMPING MATERIAL BEHAVIOR AT LOW TEMPERATURE6

Vibration damping plays a vital role in cyclic loading. There are a significant number of different dampers available. Their material properties can change significantly at low temperatures. The research aims to determine the characteristic behaviors of a rubber strap with canvas linings. We determine the loss factor of the material at different temperatures between -50 C° and +20 C°—also the static and the dynamic shear modulus. We use the Brüel & Kjaer measuring devices to change the cyclic loadings and the vibration frequencies. A special refrigerator was available to provide low temperatures down to -60 C°. The measurements were made using fabric conveyor belt specimens.

2. Imre Marada, Dr. János Bihari:

EQUIPMENT FOR THE ANALYSIS OF FAULTS OF SMALL PLASTIC GEARS12

In the case of small plastic gears, production volumes and manufacturing processes severely limit the number of methods that can be used to detect faults. It is therefore particularly important to understand the phenomena caused by faults that are also present, detectable, and measurable on the gear shafts. Among the rotational characteristics, the measurement of torque on the input side is a common test method for gear drives, especially for bevel gears. This method is also suitable for detecting certain faults in gearboxes with small gears and for distinguishing the effects of faults and manufacturing characteristics. In this research, we have established the basis and equipment, for a series of measurements that can be used to gather more definitive information than previously known, to understand the effects of faults in small plastic gears.

3. Tatiane Domokos, Atilla Baksa, Szabolcs Szávai:

FLD WITH GURSON METAL FOR SIMPLE FLAT SPECIMEN16

In the past, the prediction of ductile damage and fracture of metal materials under complex loadings has been an important topic in industries like the metal forming industry. The GTN model is one of the most classical damage models regarding damage mechanics, which has a wide application and perfect evolution in studies of fracture of ductile metal. GTN was originated from Gurson and later enhanced by Tvergaard and Needleman. The improvement consists of inserting an equivalent void volume fraction f and two more parameters called q_1 and q_2 into the yield function of Gurson's model, in order to model the complete loss of load-carrying capacity at a realistic void volume fraction.

4. Máté Petrik, Betti Bolló, Károly Jármai:

FIRE SAFETY DESIGN OF A TRUCK TANK IN A PUBLIC ROAD ACCIDENT20

The focus of the research is to determine the fire-resistant time of a truck tank containing different liquids in case of a public road accident. The wall material and the wall thickness of the tank have a significant effect on the fire resistance. Depending on the heat release rate, the process can be rapid. We make the calculations for the given tank dimensions and try to optimize the tank for the necessary fire resistance time R30 and R45.

The vessel on a track cannot be classified as a classic pressure vessel, even though the fluid in the cylindrical shell is already loading hydrostatic pressure on the vessel wall. This is due to the dynamic and fatigue loads resulting from the vehicle's progress. Typically, two problems can occur in the event of a fire in such a tank. When transporting a flammable liquid, the fire can cause the pressure in the vessel to increase, resulting in the vessel rupturing.

The use of safety equipment can avoid this. However, a BLEVE phenomenon may occur if the tank is left on fire for too long; on the other hand, when transporting solid granular materials, the medium is less able to dissipate heat, so the container may weaken under the weight load, which may also result in cracking. If the granular material is combustible, a more severe fire may develop.

5. Dr. János Bihari, Imre Marada:

TESTING BOLTED CONNECTIONS IN PLASTIC PARTS MADE BY FDM PRINTING26

FDM and MSLA printing are no longer used as just a tool for prototyping, but many working parts can be produced using these manufacturing technologies. The mechanical properties of these type of parts depend on a number of factors and cannot be as clearly defined, for example for injection molded parts. Since components are often fastened by bolted connections, it is important to know what tightening torques and clamping forces should be used for different materials, in different planes and with different filling ratios. In this research, we aimed to find answers to the question of what clamping forces can be achieved in FDM printed parts with different designs of threaded connections.

6. Dr. Péter Bencs:

REVIEW OF BUS COOLING SYSTEMS IN THE CONVERSION PROCESS30

The primary objective of this research is to investigate the cooling/heating solutions for an urban passenger bus engine cooling and battery plant (for electric drive). A general literature review was conducted to assess the thermal performance expected in a sizing process. In the context of literature, an electrical conversion was also examined to see what cooling system is used for internal combustion engines, what system is replaced and what solution is applied. In the research framework, we tried to find specific thermal performance values for a bus (urban passenger bus) defined in the assignment. The next step of the research was to explore the methods used for cooling internal combustion engines. As a final step in the literature review, the cooling and heating solutions for battery packs used in an electrical conversion were considered (maintaining the optimum temperature range of battery packs).

7. Tamás Géza Molnár, Brigitta Zsóder:

MATERIAL TESTING OF 3D PRINTED INDUSTRIAL PLASTICS IN TECHNICAL PRACTICE35

Our research was made on 3D printing and the mechanical characteristics of printed plastic components, while examining opportunities for its technical applications. We used various tear test samples with different printing technologies from different stocks, making changes to the printing parameters as well. Ready ISO plastic test bodies were submitted to a tearing examination, pulled according to the 527 standards. We compared the stock result examinations, with the tear characteristics of die-cast products, which resulted on average 25-35% lower, for 3D printed samples. The productivity differences compared to diecast, has a diminished concern because of the freedom to form various shapes and prototypes using 3D printing technology, primarily in small series or merchandising test production. 3D yields a suitable solution in this case. The collected results serve as a basis for printing and modeling of planned components and its sizing.

8. Dr. Károly Jármai:

MINIMIZING THE WEIGHT, COST
AND ENVIRONMENTAL IMPACT
OF WELDED STEEL STRUCTURES46

The article describes how to calculate the environmental impact of steel structures and how different welding technologies cause environmental impacts through the formation of gases during the process. The weight or direct cost of a steel structure can be minimized by optimizing the structure.

9. Gábor Kónya, Zsolt Ferenc Kovács:

PROBLEMS OF MACHINABILITY
OF NICKEL-BASED SUPERALLOYS54

In this paper, the problems of machinability of nickel-based superalloys are discussed, why machinability of these materials is so difficult, and the importance of R&D for industry. These superalloys are some of the most difficult materials to machine and are widely used as raw materials for gas turbines in the aerospace and energy industries. Based on industry experience, slot milling causes the biggest problem, tools wear quickly and breakages are common. Due to the high thermal strength and hardness, the cutting zone is subjected to high shear stresses, resulting in increased cutting forces, and cutting temperatures, which also stresses the tool edge due to extremely poor thermal conductivity of the material. In this paper, we will briefly summarize why the machinability of these materials is so difficult, and which data influences tool lifespan. Based on our research, we presented the effects of tool paths and cooling-lubricating processes on cutting tool life.

10. Seif Eddine Habbachi, Attila Baksa, Marwen Habbachi:

NUMERICAL MODELLING OF TRANSVERSE
SPRING LEAF WITH STEEL MATERIAL62

Automobile suspension systems (springs, shock absorbers, linkages) are becoming more important in today's world, as they contribute to a car's handling and braking, protect the vehicle itself, and protect cargo or luggage from damage and wear. Furthermore, suspension systems have many functions, like preventing the vehicle body and frame from road shocks, giving it stability, and providing comfort as well. In the meantime, suspension equipment needs to have a lower weight, maximum deflection, low maintenance, and a low operating cost. During this work, we will focus only on the leaf spring suspension type, and more precisely, the transverse leaf spring. Our project is a numerical modelling of the transverse leaf spring, using the finite element method, in order to investigate the maximum deflection and stress distribution along a deformable body with two-common vertical and anti-metrical stiffnesses configurations and compare the results with a theoretical model and with the provided data from Iveco company to validate them. Finally, an important comparison was presented between the numerical results and the provided data. In fact, results show that the structure under the applied force was safe.

11. László Pokorádi:

UNCERTAINTY ANALYSIS OF REPAIR WORK
ESTIMATION BY MONTE-CARLO SIMULATION67

Maintenance is one of the most important territories of practical engineering. From the mathematical point of view, the operation of production equipment is a discrete state space, stochastic process, without after-effects, i.e., a Markov-chain. The aim of this paper is to discuss the possibilities of using the Monte-Carlo Simulation of repairing processes, to determine necessary maintenance capacity. The proposed method can be implemented for the assessment of required maintenance capacity of a welding cell depending on allowable estimating uncertainty.

12. Aimen TANOUGAST, Krisztián HRICZÓ:

NUMERICAL SIMULATION OF NANOFUID
FLOW THROUGH A CORRUGATED CHANNEL
WITH VORTEX GENERATOR72

The radiator is an important part of the car, which cools the different parts of the vehicle by indirect heat exchange, by circulating coolant through the radiator. Heat transfer conditions are a function of the flow, geometry, and temperature characteristics. The present work concerns the numerical study of two-dimensional turbulent flow with heat transfer in a corrugated channel, with and without vortex generators, while applying Al₂O₃-water nanofluid as a heat transfer liquid.

The governing equations of the flow are the continuity equation, the momentum equation, and the energy equation modeling the heat transfer. This partial differential equation system was discretized and solved using the Ansys-Fluent commercial software based on the finite volume method. The standard k-ε model was used to model turbulence.

We analyzed the effect of parameters and the vortex generators on the solutions. The obtained results were presented graphically.

13. Dávid Bodnár, Károly Jármai:

DESIGN OF ROBOT WORKSPACE
AND STRUCTURE, A REVIEW78

The use of robots for various tasks is growing. In order to identify possible research directions, this paper aims to review the progress achieved in the optimization of workspace, lifetime and structure of robots in industrial or medical applications. Medical applications are considered because of the potential for improved accuracy and control and reduced invasiveness compared to traditional surgical methods. This review will form the basis for future research on the topic, identifying possible research directions using the algorithms and techniques reviewed. The focus is on workspace and structure optimization, with an emphasis on cost-effectiveness.

The articles in the current issue of GÉP were reviewed by two professional reviewers. The reviewers were (without naming the articles):

*Bodnár Dávid • Nagy Szilárd • Orbán Ferenc • Szirbik Sándor •
Hanka László • Máté Márton • Tolvaş-Roşca Ferenc •
Pokorádi László • Virág Zoltán • Koós Dániel*

GÉP

INFORMATIVE JOURNAL

for Technics, Enterprises, Investments, Sales, Research-Development, Market of the Scientific Society of
Mechanical Engineering

Dr. Döbröczöni Ádám
President of Editorial Board

Vesza József
General Editor

Dr. Jármái Károly
Dr. Péter József
Dr. Szabó Szilárd
Deputy

Dr. Barkóczi István
Bányai Zoltán
Dr. Beke János
Dr. Bukoveczky György
Dr. Czitán Gábor
Dr. Danyi József
Dr. Gáti József
Dr. Horváth Sándor
Dr. Illés Béla
Dr. Kalmár Ferenc
Dr. Orbán Ferenc
Dr. Pálincás István
Dr. Patkó Gyula
Dr. Péter László
Dr. Penninger Antal
Dr. Szabó István
Dr. Szántó Jenő
Dr. Szűcs Edit
Dr. Tímár Imre
Dr. Tóth László

DEAR READER,

Emerson is a global technology and software company providing innovative solutions for the world's essential industries. The Emerson factory in Eger is one of the strong pillars of both Hungarian pneumatics production and Emerson's Discrete Automation business. It has always placed great emphasis on the employment of highly qualified and talented colleagues, as this is one of the main guarantees of world-class operations. Cooperation with university students and lecturers has been the main activity of the company since its inception.

The InnoVETAS2023 conference of the Agria Conference Series, held for the seventh time this April 2023, is a fine example of the collaborative process during which Emerson Automation FCP Kft. provides university students and researchers with the opportunity to present their latest research results. In 2023, the InnoVETAS2023 conference was expanded with the 1st Emerson Technical Playground competition, which included a panel of judges and an award ceremony. In addition to the technical and scientific lectures, the equipment designed and made by the students made the event colorful.

At the plenary session of the InnoVETAS2023 conference, those interested could listen to the presentation of managing director, István Gödri, about the situation of the Eger site. He highlighted the curve of the conference's development, which enables even closer cooperation between students and Emerson. Afterwards, Stéphanie De Boissieu, Vice President of Emerson's Manufacturing Automation Strategy Business Unit, gave her opening speech. In addition to presenting Emerson and the business unit, she helped engineering students by presenting about skills and abilities valuable to companies. She pointed out the importance of „soft skills,” cooperation and language skills, in addition to engineering knowledge.

The constantly growing number of speakers and interested parties at the conference shows the worthiness and importance of the Agria Conference series among the international conferences organized in Hungary, as well as the growing demand for cooperation between education and industry.

Dr. László Soltész
Organizing committee chair
Director of Product Development
Emerson Factory Automation

Prof. Dr. László Pokorádi
Founder chair
Óbuda University
Institute of Mechatronics and Vehicle
Engineering

Managing Editor: Vesza József. Editor's address: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Phone: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Postal address: 1371, Bp, Pf. 433

Phone: +36-1/202-0656, Fax: +36-1/202-0252, E-mail: mail@gteportal.eu, Web: www.gteportal.eu

Web: <http://www.gepujsag.hu> • Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Publisher: Dr. Bárdos Krisztina, Managing Director
Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Phone: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Distributed to subscribers by Magyar Posta Zrt, Postal address: 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered at any Hungarian post office, from postmen, from the link: www.posta.hu WEBSHOP (<https://eshop.posta.hu/storefront/>), via e-mail: hirlapelofizetes@posta.hu, by phone: +36-1/767-8262, or mail to: MP Zrt. 1900 Budapest
Subscription: subscription can be ordered from overseas and to overseas at Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14.
T: +36 1 201 88 91, +36 1 212 53 03, E-mail: batthyany@kultur-press.hu

Domestic subscription prices are: HUF 1,260 a single copy and HUF 2,520 a double copy.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

The published articles have been reviewed. • The publication is supported by the National Cultural Fund of Hungary

Tekints a jövőbe!



IPAR NAPJAI

10. Nemzetközi ipari szakkiallítás

2023. május 16–19.



IPAR NAPJAI **Nemzetközi ipari szakkiallítás**

Társrendezvény: AUTOMOTIVE HUNGARY Nemzetközi járműipari beszállítói szakkiallítás

Látogasson el Ön is Magyarország legnagyobb és legjelentősebb üzleti eseményére és találkozájára az iparban! Tekintse meg a széles kiállítói kínálatot, vegyen részt a szakmai programokon!

Helyszín: HUNGEXPO Budapest Kongresszusi és Kiállítási Központ



Látogatók részére előzetes online regisztráció az ingyenes belépésért:
www.iparnapjai.hu/gte

Töltse le a HUNGEXPO applikációt és tájékozódjon könnyen és egyszerűen a programokról és a helyszíni tudnivalókról!

Bővebb információ: www.iparnapjai.hu



Gondolkodjunk másképp **Let's Go**

Az Emersonnál az EMBER áll minden tevékenységünk középpontjában. LET'S GO! Gyere és gondolkodj velünk másképp! Keressük a lehetőségeket, tanuljunk és fejlődjünk! Toljuk ki a határokat és legyünk mi, akik tesznek a fejlődésért. Csatlakozz hozzánk, menjünk tovább együtt!

További információ az [Emerson.com/Careers](https://emerson.com/careers) oldalon.

