

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA

Lendület van.



IPAR NAPJAI

Nemzetközi ipari szakkonferencia

2018. május 15-18.



hungexpokiallitás
programod van

2018/2.

nka
Nemzeti Kulturális Alap

68 oldal
LXIX. évfolyam



2nd International Conference on Vehicle and Automotive Engineering - 23-25 May 2018, University of Miskolc, Hungary

II. Nemzetközi Jármű- és Autóipari Konferencia, VAE2018 2018. május 23-25. Miskolci Egyetem

<http://vae2018.uni-miskolc.hu> • E-mail: vae2018@uni-miskolc.hu

A KONFERENCIA TÉMÁI:

- A. Hagyományos erőátvitel és emissziók
 - B. Alternatív hajtások
 - C. Jármű dinamika
 - D. Anyagok és gyártás
 - E. Járműelektronika
 - F. Autonóm járművek
 - G. Zaj és rezgés
 - H. Aktív és passzív biztonság
 - I. Fenntarthatóság
 - J. Oktatás
- K. A járműszerkezetek és a felületek tervezése
 - L. Optimálás
 - M. Hegesztés

Hívunk és várunk kiállítókat a Nemzetközi jármű- és autóipari konferenciára. A konferencia célja, hogy összefogja mind az egyetemi, mind az ipari területek szakértőit. Pályaorientációs napot szervezünk a borsod megyei középiskolásoknak a NOHAC és a BOKIK részvételével május 24-én.

Normál stand igénylés

ára: 8.000,- Ft/m²+Áfa

Frízfelirat egyszínben

ára: 5.500,- Ft/db+Áfa

Frízfelirat mellé embléma

ára: 5.500,- Ft/db+Áfa

Oldtimer autó- és motorkerékpár-bemutató lesz a konferencia ideje alatt, ahol remélhetőleg egy Ford T modell is látható lesz. Továbbá a miskolci autószalonnak kiállítanak az új modellekből.

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. Bercsey Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Kármán Antal

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálincás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

Dr. Zobory István

TISZTELT OLVASÓ!

A Miskolci Egyetemen a 4-es Kiválósági Központ keretében *Innovatív Járműmérnöki, Energetikai és Gépészeti Tervezés és Technológiák* címmel folynak kutatások. A központ célja a kutatási potenciál fejlesztése olyan kutatásokkal, amelyek innovatív modellezést, tervezést és technológiai folyamatokat valósítanak meg, összhangban az Európai Unió azon törekvéseivel, amely az innováció serkentésére, a leghatékonyabb környezetbarát technológiák alkalmazására és fejlesztésére irányul. A Kiválósági Központ szeretné az elért eredményeket továbbfejleszteni, újakkal bővíteni. A 2014-2020-as időszakra, a formálódó GINOP és EFOP pályázatokra számos témajavaslatot dolgoztunk ki. Remélhetőleg ezek beépítésre kerülnek még az elkövetkező pályázati kiírásokba.

A 2016-ban a Miskolci Egyetemen elindult járműmérnök képzés új kiadványokat teremtett. Az új doktoranduszok, akik részben a Stipendium Hungaricum keretében érkeztek hozzánk szintén lendületet adtak bizonyos területeken. Ezen új irányok és eredmények bemutatását kívánjuk ezzel a folyóiratszámunkkal megvalósítani.

A cikkek túlnyomó része a 4-es KK 6-os Tudományos Műhelye eredménye, aminek témaköre a Mérnöki tartó- és vázszerkezetek optimális méretezése. Az összes cikk kapcsolódik az Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet Vegyipari Gépek Tanszékéhez.

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

Az utolsó két cikk a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem kollégáinak produktuma.

Prof. Dr. Jármái Károly
a Kiválósági Központ vezetője

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

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

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

Telefon: 06-1/202-0656, fax: 06-1/202-0252, e-mail: mail@gteportal.eu, internet: www.gteportal.eu

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

Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Igaz Jenő ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Telefon: 06-46/379-530 • e-mail: gazdasz@chello.hu

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

Előfizetésben megrendelhető az ország bármely postáján, a hírlapot kézbesítőknél, www.posta.hu WEBSHOP-ban (<https://eshop.posta.hu/storefront/>), e-mailen a hirlapelofizetes@posta.hu címen, telefonon 06-1-767-8262 számon, levélben a MP Zrt. 1900 Budapest címen. Külföldre és külföldön előfizethető a Magyar Posta Zrt.-nél: www.posta.hu WEBSHOP-ban (<https://eshop.posta.hu/storefront/>), 1900 Budapest, 06-1-767-8262, hirlapelofizetes@posta.hu

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

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

A megjelent cikkek lektoráltak.

A kiadvány a Nemzeti Kulturális Alap támogatásával jelenik meg.

TARTALOM

1. Luis M.C. Simões, Jármái Károly, Virág Zoltán:
**HOSSZIRÁNYÚ MEREVÍTŐKKEĹ, ELLÁTOTT
HEGESZTETT LEMEZEK MEGBÍZHATÓSÁG-
ALAPÚ KÖLTSÉGSZÁMÍTÁSA** 5
A tanulmány célja síkban vagy kombinált síkban és keresztirányú terhelésnek kitett bordázott lemezek megbízhatóság alapú optimalizálása. A vizsgálat során II. szintű megbízhatósági módszert (FORM) alkalmazunk. A teljes szerkezeti megbízhatóság a Ditlevsen feltételes határoló módszer alkalmazásával érhető el. „Branch and bound” stratégiát alkalmazzuk az ϵ -optimális költségek meghatározására, melyek megoldások az optimum meghatározott tőrésén belül.
2. Dr. Jármái Károly:
**VÉKONYFALÚ HEGESZTETT SZERKEZETEK
KÖLTSÉGSZÁMÍTÁSA KÜLÖNBÖZŐ GYÁRTÁSI
TECHNOLÓGIÁKKAL** 13
A tanulmány leírja, hogyan kell kiszámítani hegesztett szerkezetek azon költségeit, amelyek közvetlenül kapcsolódnak a szerkezeti méretekhez. A költségoptimalás egy nyomásnak kitett bordázott hegesztett lemezen került bemutatásra. A számítások azt mutatják, hogy a költségek nagymértékben függenek a hegesztési és vágási technológiától, még vékonyabb lemezek esetén is.
3. Spisák Bernadett, Beleznai Róbert:
**KOMPOZIT ANYAGBÓĹ KÉSZÜLT OLAJTEKNŐ
FRÖCCSÖNTÉS SZIMULÁCIÓJA** 21
A polimer alapú kompozitok esetében a legelterjedtebb gyártási módszer a fröccsöntés. Ezt az eljárást választották az olajteknő gyártási folyamatára, és a fröccsöntési szimulációt hajtottak végre. Ezen kutatási eredményei kerülnek bemutatásra a cikkben.
4. Petrik Máté, Szepesi Gábor, Jármái Károly:
**CSŐKÖTEGES HŐCSERÉĹ CSŐ OLDALI
HŐÁTADÁSÁNAK ANALITIKUS ÉS NUMERIKUS
SZÁMÍTÁSNAK ÖSSZEHAŠONLÍTÁSA MÉRÉSI
EREDMÉNYEKKEL** 25
Bemutatja egy héj- és cső hőcserélő modelljét. Vízszintes terelőkkel numerikusan vizsgálták a viselkedését és összehasonlították a mért értékekkel az SC-Tetra VII kereskedelmi szoftver segítségével kapott szimulációs eredményeket.
5. Dr. Jármái Károly:
**FARKAS JÓZSEF PROFESSZOR SZAKMAI ÉLETE
A SZERKEZET OPTIMALÁS TERÜLETÉN** 29
Ez a cikk Farkas József professzor szakmai tevékenységével és életével foglalkozik. Aki a Miskolci Egyetemen 1950-ben kezdte pályafutását. Fő kutatási területei a szerkezet optimalás, a hegesztett szerkezetek méretezése és a szerkezetek stabilitása.
6. Dr. Kota László, Dr. Jármái Károly:
**TÖBBSZINTŰ OPTIMÁLÓ ALGORITMUS
ALKALMAZÁSA** 32
Ebben a cikkben bemutatunk és értékelünk néhány többszintű optimáló módszert, amelyeket több teszt-függvénnyel teszteltünk, összehasonlítva a konvergencia és a számítási idő igényeket.
7. Hazim Nasir Ghafil, Dr. Jármái Károly:
**IPARI ROBOT ÉS MANIPULÁTOROK KUTATÁSA
ÉS ALKALMAZÁS JÁRMŰ-ÉS AUTÓIPARI
MÉRNÖKI TERÜLETEKEN, ÁTTEKINTÉS** 36
Ez a munka áttekinti a robot manipulátorok és különböző alkalmazások használatát az autóiparban és a járműiparban, valamint az alkalmazások és az optimalizált robot manipulátorok közötti kapcsolatot, valamint a robot alkalmazási statisztikákat világszerte.
8. Nagy Szilárd, Dr. Jármái Károly:
**ALAP, HIBRID ÉS TÖBBSZINTŰ EVOLÚCIÓS
ALGORITMUSOK** 44
A cikkben bemutatásra kerültek alap és ezekből kombinált evolúciós módszerek, melyek különböző teszt-függvényekkel lettek vizsgálva. Kis változójú problémáknál mind az eredeti módszerek, mind a többszintű és hibrid módszerek gyorsan tartanak az optimum felé. A változók számának növekedésével ez a képesség egyre jobban romlik, és egyre nagyobb valószínűséggel csak lokális minimumot talál. Az összetett eljárások a jelen teszt-függvényekkel végzett szimulációkban hatékonyabbak voltak az alap algoritmusoknál.
9. Fehér Márk, Dr. Takács János:
**TESTRESZABOTT ADDITÍV GYÁRTÁSŰ FÉM
PROTÉZISEK ANYAGTULAJDONSÁGAI ÉS
VIZSGÁLATUK** 52
Az orvosi implantátumok tervezése és gyártása komplex feladat. Az anyag összetételének pontos meghatározása így kiemelten fontos, amelyre gyors és megbízható vizsgálati eredményt ad GDOES alkalmazása. Ez a publikáció egy ilyen mérés eredményeit mutatja be, kitérve az implantátum legfontosabb minőségi követelményeire.
10. Varga Laura Georgina, Dr. Takács János:
**EGYÉNRE SZABOTT HUMAN IMPLANTÁTUMOK
3D-S MODELLJÉNEK KIALAKÍTÁSI
MEGFONTOLÁSAI AZ ADDITÍV
GYÁRTÁSHOZ** 59
A publikáció az egyénre szabott implantátumok modelljének kialakításával foglalkozik. Bemutatásra kerül az, hogyan állítható elő egy implantátum (csontmodell) orvosi diagnosztikai eszközök (pl.: CT, MRI) segítségével készített digitális állományok alapján. A geometriai megfelelés mellett, figyelembe kell venni a biokompatibilitási szempontokat, illetve az emberi csont tulajdonságait.

HOSSZIRÁNYÚ MEREVÍTŐKKEL ELLÁTOTT HEGESZTETT LEMEZEK MEGBÍZHATÓSÁG-ALAPÚ KÖLTSÉGSZÁMÍTÁSA

RELIABILITY-BASED COST DESIGN OF LONGITUDINALLY STIFFENED WELDED STEEL PLATES

Luis M.C. Simões*, Jármái Károly **, Virág Zoltán ***

ABSTRACT

The aim of this work is the reliability-based optimization of a stiffened plate subjected to in-plane or combined in-plane and transverse loading. The design variables are the thickness of the base plate, the number of stiffeners and their thickness. The constraints deal with the overall plate buckling, the stiffener failure and the distortion of the plate due to welding. The cost function includes the cost of material, assembly and welding. A level II reliability method (FORM) is employed. The overall structural reliability is obtained by using Ditlevsen method of conditional bounding. The branch and bound strategy is employed to enumerate ε -optimum costs, which are solutions within a specified tolerance of the optimum.

ÖSSZEFOGLALÓ

A tanulmány célja síkban vagy kombinált síkban és keresztirányú terhelésnek kitett bordázott lemezek megbízhatóság alapú optimalizálása. A tervezési változók az alaplemez vastagsága, a bordák száma és vastagsága. A feltételek a teljes lemez horpadás, a borda tönkremenetel és a hegesztésből adódó lemez deformáció. A költség függvény tartalmazza az anyagköltséget, az összeszerelési költséget és a hegesztés költségét. A vizsgálat során II. szintű megbízhatósági módszert (FORM) alkalmazunk. A teljes szerkezeti megbízhatóság a Ditlevsen feltételes határoló módszer alkalmazásával érhető el. „Branch and bound” stratégiát alkalmazzuk az ε -optimális költségek meghatározására, melyek megoldások az optimum meghatározott tűrésén belül.

1. BEVEZETÉS

A hegesztett bordázott lemezek gyakran fő szerkezeti elemei különböző teherviselő szerkezeteknek, pl. hajóknak, hidaknak, bunkereknek, tartály tetőknek, offshore szerkezeteknek, járműveknek stb. A szerkezetek különböző terhelésnek vannak kitéve, mint pl. nyomás, hajlítás, nyírás vagy kombinált terhelés. A lemezek alakja lehet négyzet, téglalap, kör, trapéz stb. Merevíthetjük őket egy vagy két irányban különböző lemez, L, trapéz vagy más alakú bordákkal.

A minimális költségre való tervezés megtalálható hajlított négyzetes és téglalap alakú bordázott és cellalemezekre [1], egytengelyűleg nyomott lemez és L-bordás lemezre [2,3], excentrikus nyomással terhelt hegesztett acél lemezekre [4], kétirányban terhelt lemezekre [5] nyitott és zárt szelvényvel merevített hegesztett hídpályákra [6]. A megbízhatóság alapú diszkrét optimalizálást bordázott lemezek és héjak tervezésére [7-9] és a fáradási előírások kielégítésére használták [10].

Ez a tanulmány L- és trapézbordás téglalap alakú lemezek megbízhatóság alapú optimalizálásával foglalkozik, melyek bordairányban nyomottak síkban és kereszt irányban. A méretezés során Mikami és Niwa [11] tervezési előírásait használtuk.

Minimális költségre való tervezésben azt az optimális szerkezetet keressük, amely minimalizálja a költségeket és teljesíti a tervezési feltételeket. A költség függvény tartalmazza az alapanyag és a gyártási költségeket [12], a minőségi előírás pedig előírja a megengedhető deformációt, amelyet a maradandó hegesztési feszültség okoz [13].

Az I. típusú kódtípus előnye (a kódok nélküli parciális biztonsági tényező alkalmazásával) az, hogy a határállapotokat csak kevés változó kombinációval kell ellenőrizni. A biztonsági tényezőket gyakran a struktúra komponenseiből származtatják, figyelmen kívül hagyva a rendszer viselkedését. Ezt a problémát leginkább

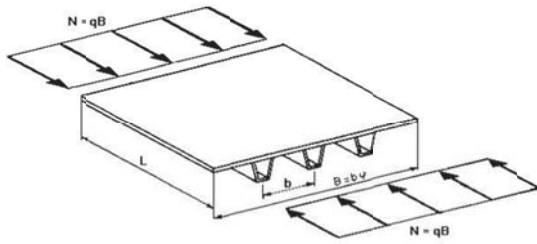
* egyetemi tanár, Dep. Civil Engineering, University of Coimbra, Portugal

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

*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Geotechnikai Berendezések Intézet Tanszék

kifinomultabb megbízhatósági módszerek, például a II-es szintű (elsőrendű, másodrendű megbízhatósági módszer, FOSM (First-Order Second-Moment Method) [14]) és III-as szintű (Monte Carlo) megbízhatósági módszerek segítségével lehet megoldani. Ebben a munkában az FOSM módszert használtuk, és analitikusan nyertük ki az érzékenységi információt. Amellett, hogy meghatároztuk a meghibásodás maximális valószínűségeit az egyes módok esetében, figyelembe vesszük a teljes meghibásodási valószínűséget, amely figyelembe veszi az interakciót a meghibásodási módok korrelálásával.

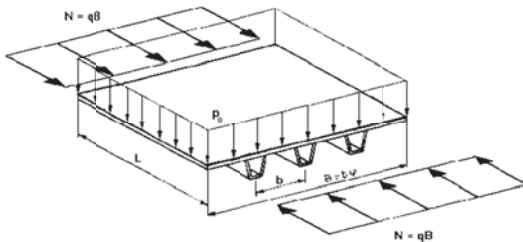
A megbízhatóság alapú optimalizálás megoldásához egy entrópia alapú algoritmussal társított „branch and bound” stratégiát alkalmaznak [8]. Az entrópia alapú eljárást az optimális, folyamatos tervezési változók megtalálásához használjuk, melyek alsó határokat adnak a döntési fa számára. A diszkrét megoldásokat implicit számba vétellel találjuk meg. A „branch and bound” stratégiát az ε -optimum költségek számba vételére használjuk, melyek a meghatározott tűréshatáron belül megoldások az optimumra. Miután megtaláltuk az optimumot egy maximális költséget határozunk meg, amely egy új támpont lesz. Visszaugorva és javítva az új irányból minden alacsonyabb költségű alternatívát, a vizsgálat végén ezek lesznek az optimum közeli megoldások.



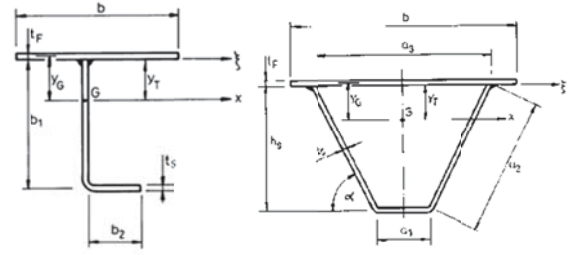
1. ábra Egytengelyű nyomásnak kitett bordázott lemez

2. A VIZSGÁLT SZERKEZET GEOMETRIÁJA ÉS A TERVEZÉSI VÁLTOZÓK

A vizsgált bordázott lemezek négy él mentén alátámasztottak. A vizsgált szerkezet geometriáját és a különböző terhelési eseteket az 1. és 2. ábra mutatja be. A tervezési változók az alaplemez vastagság t_f , a bordák vastagsága t_s és a bordák száma n .



1 ábra. Egytengelyű nyomásnak és hajlításnak kitett bordázott lemez



2. ábra Az L és trapéz bordák geometriája

2.1. Az L és trapéz borda adatai

Feltéve, hogy b a borda közök nagysága, $\varphi = n+1$ és $\nu = 0.3$

$$\varepsilon = \left(\frac{235}{f_y} \right)^{1/2}; \delta_s = \frac{A_s}{bt_f}; \gamma_s = \frac{EI_s}{bD} \quad (1)$$

$$D = \frac{Et_f^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{Et_f^3}{10.92}; h = t_f + \frac{A_s}{b}; b = \frac{B}{\varphi} \quad (2)$$

A_s egy borda keresztmetszeti területe, $\varphi-1$ a bordák száma, I_s egy borda inercianyomatéka ξ tengely szerint (3. ábra).

L borda geometriai paraméterei:

$$A_s = (b_1 + b_2)t_s \quad (3)$$

$$b_1 = 30t_s\varepsilon \quad (4)$$

$$b_2 = 12.5t_s\varepsilon \quad (5)$$

$$y_G = \frac{b_1t_s \frac{b_1+t_f}{2} + b_2t_s \left(b_1 + \frac{t_f}{2} \right)}{bt_f + A_s} \quad (6)$$

$$I_x = \frac{bt_f^3}{12} + bt_f y_G^2 + \frac{b_1^3 t_s}{12} + b_1 t_s \left(\frac{b_1}{2} - y_G \right)^2 + b_2 t_s (b_1 - y_G)^2 \quad (7)$$

$$I_s = \frac{b_1^3 t_s}{3} + b_1^2 b_2 t_s \quad (8)$$

$$I_t = \frac{b_1 t_s^3}{3} + \frac{b_2 t_s^3}{3} \quad (9)$$

$$I_\omega = \frac{b_1^2 b_2^3 t_s}{3} \quad (10)$$

A trapéz borda geometriai paraméterei:

$$A_s = (a_1 + 2a_2)t_s \quad (11)$$

$$a_2 = \sqrt{\left(\frac{a_3 - a_1}{2} \right)^2 + h_s^2} \quad (12)$$

A figyelembevett minimális értékek $a_1 = 90$ és $a_3 = 300$ mm [15], így

$$h_s = (a_2^2 - 105^2)^{1/2} \quad (13)$$

$$\sin^2 \alpha = 1 - \left(\frac{105}{a_2}\right)^2 \quad (14)$$

$$y_G = \frac{a_1 t_s (h_s + t_F / 2) + 2 a_2 t_s (h_s + t_F) / 2}{b t_F + A_s} \quad (15)$$

$$I_x = \frac{b t_F^3}{12} + b t_F y_G^2 + a_1 t_s \left(h_s + \frac{t_F}{2} - y_G\right)^2 + \frac{1}{6} a_2^3 t_s \sin^2 \alpha + 2 a_2 t_s \left(\frac{h_s + t_F}{2} - y_G\right)^2 \quad (16)$$

$$I_S = a_1 h_s^3 t_s + \frac{2}{3} a_2^3 t_s \sin^2 \alpha \quad (17)$$

$$I_t = \frac{4 A_p^2}{\sum b_i / t_i} \quad (18)$$

$$A_p = h_s \frac{a_1 + a_3}{2} = 195 h_s \quad (19)$$

$$\sum \frac{b_i}{t_i} = \frac{a_1 + 2 a_2}{t_s} + \frac{a_3}{t_F} \quad (20)$$

A trapézbordás lemez helyi horpadási feltétele $a_2 / t_s \leq 38 \varepsilon$ (21)

ami aktív feltételnek vehető.

3. A SIKBAN NYOMÁS TERVEZÉSI FELTÉTELEI

3.1 A teljes bordázott lemez horpadása

Mikami és Niwa [11] kísérletei alapján a terheletlen szerkezet kezdeti alak-pontatlanságát és a bordázott lemez gyártása során maradandó hegesztési feszültség hatását is figyelembe vesszük a horpadási görbében. Így számíthatjuk a redukált karcsúságot

$$\lambda = (f_y / \sigma_{cr})^{1/2} \quad (22)$$

ahol σ_{cr} a klasszikus kritikus horpadási feszültség, amely nem tartalmazza a fent említett hatásokat, f_y a folyáshatár.

A klasszikus kritikus horpadási feszültség hosszirányban nyomott hosszirányban bordázott lemezre

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 D}{h B^2} \left(\frac{1 + \gamma_s}{\alpha_R^2} + 2 + \alpha_R^2 \right)$$

ahol

$$\alpha_R = L / B < \alpha_{R0} = (1 + \gamma_s)^{1/4} \quad (23a)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{2 \pi^2 D}{h B^2} \left[1 + (1 + \gamma_s)^{1/2} \right] \text{ ahol } \alpha_R \geq \alpha_{R0} \quad (23b)$$

A tényleges teljes horpadási feszültség a következőképpen számítható:

$$\sigma_U / f_y = 1 \text{ ahol } \lambda \leq 0.3 \quad (24a)$$

$$\sigma_U / f_y = 1 - 0.63(\lambda - 0.3) \text{ ahol } 0.3 \leq \lambda \leq 1 \quad (24b)$$

$$\sigma_U / f_y = 1 / (0.8 + \lambda^2) \text{ ahol } \lambda > 1 \quad (24c)$$

Ez a horpadási görbe tartalmazza a kezdeti alakpontatlanság és a maradandó hegesztési feszültség hatását, ezért kisebb értéket ad, mint a klasszikus kritikus horpadási görbe, amely elhanyagolja ezeket.

A teljes horpadási feltétel:

$$\frac{N}{A} \leq \sigma_U \frac{\rho_P + \delta_s}{1 + \delta_s} \quad (25)$$

ahol

$$A = B t_f + (\varphi - 1) A_s \quad (26)$$

és ρ_P tényező a következőképpen függ a feszültségektől:

$$\rho_P = 1 \text{ ha } \sigma_{UP} > \sigma_U \quad (27a)$$

$$\rho_P = \sigma_{UP} / f_f \text{ ha } \sigma_{UP} < \sigma_U \quad (27b)$$

3.2. Alaplemez horpadás

Ez a feltétel az alaplemez bordák közötti helyi horpadására írható fel. A klasszikus horpadási feszültség az egy irányban nyomott esetben felírható

$$\sigma_{crP} = \frac{4 \pi^2 E}{10.92} \left(\frac{t_F}{b} \right)^2 \quad (28)$$

A redukált karcsúsági tényező L-borda esetén

$$\lambda_P = \left(\frac{4 \pi^2 E}{10.92 f_y} \right)^{1/2} \frac{b}{t_F} = \frac{b / t_F}{56.8 \varepsilon} \quad (29)$$

és trapézborða esetén

$$\lambda_P = \left(\frac{4 \pi^2 E}{10.92 f_y} \right)^{1/2} \frac{b_1}{t_F} = \frac{b_1 / t_F}{56.8 \varepsilon} \quad (30)$$

ahol

$$b_1 = b - 300 \text{ ha } b - 300 \geq a_3 \quad (31a)$$

$$b_1 = a_3 = 300 \text{ ha } b - 300 \leq a_3 \quad (31b)$$

és a kezdeti alakpontatlanságtól és maradandó hegesztési feszültségtől függő horpadási feszültség

$$\sigma_{UP} / f_y = 1 \text{ ha } \lambda_P \leq 0.526 \quad (32a)$$

$$\frac{\sigma_{UP}}{f_y} = \left(\frac{0.526}{\lambda_P} \right)^{0.7} \text{ ha } \lambda_P \geq 0.526 \quad (32b)$$

Az alaplemez horpadási feltétel

$$\frac{N}{A} \leq \sigma_{UP} \quad (33)$$

3.3. Bordák helyi horpadásának és elcsavaródó kihajlásának számítása

Az elcsavaródó kihajlásra vonatkozó feszültségi feltétel L borda esetén a következő

$$N / A \leq \sigma_{UT} \quad (34)$$

A klasszikus elcsavarodási kihajlási feszültség

$$\sigma_{crT} = \frac{GI_t}{I_S} + \frac{EI_\omega}{L^2 I_S} \quad (35)$$

ahol $G = E/2.6$ a nyírási modulus, I_S a poláris inercianyomaték, I_t az elcsavarodási inercianyomaték és I_ω a torzulási konstans. Az elcsavaródó kihajlási feszültség a redukált karcsúság függvényében számolható

$$\lambda_T = (f_y / \sigma_{crT})^{1/2} \quad (36)$$

$$\sigma_{UT} / f_y = 1 \quad \text{ha} \quad \lambda_T \leq 0.45 \quad (37a)$$

$$\frac{\sigma_{UT}}{f_y} = 1 - 0.53(\lambda_T - 0.45) \quad \text{ha} \quad 0.45 \leq \lambda_T \leq 1.41 \quad (37b)$$

$$\frac{\sigma_{UT}}{f_y} = \frac{1}{\lambda_T^2} \quad \text{ha} \quad \lambda_T \geq 1.41 \quad (37c)$$

3.4. Lehajlási feltétel

A nagy hosszirányú hegesztésből származó lehajlásokat kerülni kell. A megengedhető maradandó alakváltozást f_0 tervezési szabványok írják elő. Nyomott merevítőkre a Eurocode 3 (EC3) [16] szerint $f_0 = L/1000$ alkalmazható, így a lehajlási feltétel

$$f_{\max} = CL^2 / 8 \leq f_0 = L / 1000 \quad (38)$$

ahol az acélok görbülete

$$C = 0.844x10^{-3} Q_T y_T / I_x \quad (39)$$

Q_T a hőbevétel, y_T a hegesztési excentricitás

$$y_T = y_G - t_F / 2 \quad (40)$$

$$Q_T = 2x59.5a_w^2 \quad (41)$$

I_x az alapelemezt és a bordát is magába foglaló b szélességre vett inercianyomaték és $a_w = 0.5t_s$, ahol $a_{wmin} = 4$ mm.

4. TERVEZÉSI FELTÉTELEK SÍKBELI NYOMÁSRA ÉS KERESZTIRÁNYÚ TERHELÉSRE

Paik és társai [17] differenciálegyenleteket alkalmaznak ortotrop lemezek nagy deformációjának meghatározására, és a Galerkin módszert a következő harmadfokú egyenlet megoldására, melynek változója az A_m rugalmas deformáció

$$C_1 A_m^3 + C_2 A_m^2 + C_3 A_m + C_4 = 0 \quad (42)$$

ahol

$$C_1 = \frac{\pi^2}{16} \left(E_x \frac{m^4 B}{L^3} + E \frac{L}{B^3} \right); \quad C_2 = \frac{3\pi^2 A_{om}}{16} \left(E_x \frac{m^4 B}{L^3} + E \frac{L}{B^3} \right)$$

$$C_3 = \frac{\pi^2 A_{om}^2}{8} \left(E_x \frac{m^4 B}{L^3} + E \frac{L}{B^3} \right) + \frac{m^2 B}{L} \sigma_{xav} +$$

$$+ \frac{\pi^2}{t_F} \left(D_x \frac{m^4 B}{L^3} + 2H \frac{m^2}{LB} + D \frac{L}{B^3} \right)$$

$$C_4 = A_{om} \frac{m^2 B}{L} \sigma_{xav} - \frac{16LB}{\pi^4 t_F} p$$

$$E_x = E \left(1 + \frac{nA_S}{Bt_F} \right); \quad E_y = E \quad (43)$$

ahol m a horpadási félhullámhosszak száma.

$$\left(\frac{L}{B} \right)^4 \leq \frac{D_x}{D_y} m^2 (m+1)^2 \quad (44)$$

$$\sigma_{xav} = \frac{N}{Bt_f + (\varphi - 1)A_S} \quad (45)$$

Az önsúlyt figyelembe vesszük a lehajlás számításánál

$$p = p_0 + \frac{\rho V g}{BL} \quad (46)$$

ahol g a gravitációs állandó.

Az ortotrop lemez hajlítási merevsége és csavarómerevsége

$$D_x = \frac{Et_F^3}{12(1-\nu_{xy}^2)} + \frac{Et_F y_G^2}{1-\nu_{xy}^2} + \frac{EI_x}{b} \quad (47)$$

$$D_y = \frac{Et_F^3}{12(1-\nu_{xy}^2)}$$

$$\nu_x = \frac{\nu}{0.86} \sqrt{\frac{\frac{E}{E_x} \left(\frac{Et_F^3}{12} + Et_F y_G^2 + \frac{EI_x}{b} \right) - \frac{Et_F^3}{12}}{\frac{EI_x}{b} \left(\frac{E}{E_x} \right)^2}} \quad (48)$$

$$\nu_y = \frac{E}{E_x} \nu_x; \quad \nu_{xy} = \sqrt{\nu_x \nu_y} \quad (49)$$

$$H = \frac{G_{xy} I_t}{b}; \quad G_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu_{xy})} \quad (50)$$

A deformáció a függőleges terhelés hatására

$$A_{om} = \frac{5qL^4}{384EI_x}; \quad q = pb; \quad b = B/\varphi \quad (51)$$

(40) egyenlet megoldása

$$A_m = -\frac{C_2}{3C_1} + k_1 + k_2 \quad (52)$$

ahol

$$k_1 = \sqrt[3]{-\frac{Y}{2} + \sqrt{\frac{Y^2}{4} + \frac{X^3}{27}}}; \quad k_2 = \sqrt[3]{-\frac{Y}{2} - \sqrt{\frac{Y^2}{4} + \frac{X^3}{27}}} \quad (53)$$

$$X = \frac{C_3}{C_1} - \frac{C_2^2}{3C_1^2}; \quad Y = \frac{2C_2^3}{27C_1^3} - \frac{C_2 C_3}{3C_1^2} + \frac{C_4}{C_1} \quad (54)$$

A feszültségi feltétel tartalmazza a hosszirányú nyomás, az oldalirányú nyomás és a hosszirányú varratok zsugorodásából származó átlagos nyomófeszültséget és hajlítófeszültséget.

$$\sigma_{\max} = \sigma_{xav} + \frac{M}{I_x} y_G \leq \sigma_{UP} \quad (55)$$

ahol

$$M = N(A_{0m} + A_m + f_{\max}) + \frac{qL^2}{8} \quad (56)$$

és σ_{UP} ismert (29)-(32) egyenletekből.

5. A KÖLTSÉG FÜGGVÉNY

Az anyag és a gyártási költség összege a költség függvény a célfüggvény, amit minimalizálni kell

$$K = K_m + K_f = k_m \rho V + k_f \sum T_i \quad (57)$$

vagy más alakban

$$\frac{K}{k_m} = \rho V + \frac{k_f}{k_m} (T_1 + T_2 + T_3) \quad (58)$$

ahol ρ az anyag sűrűsége, V a szerkezet térfogata, K_m és K_f az anyag és gyártási költségek, k_m és k_f az anyag és gyártási költség tényezők, T_i előállítási idők a következők szerint:

T_1 az előkészítési, összeszerelési és összefűzési idő

$$T_1 = \Theta_d \sqrt{\kappa \rho V} \quad (59)$$

ahol Θ_d a hegesztett szerkezet bonyolultsági tényezője, κ a szerkezet összeszerelendő részeinek száma;

T_2 a hegesztési idő, és T_3 a járulékos idők, mint például elektróda csere, salaklehzás és sorjázás.

$T_3 \approx 0.3 T_2$, így,

$$T_2 + T_3 = 1.3 \sum C_{2i} a_{wi}^n L_{wi} \quad (60)$$

ahol L_{wi} a varratok hossza, a $C_{2i} a_{wi}^n$ varratra jellemző értékét COSTCOMP [12] software által meghatározott formulákból és diagramokból kapjuk meg, ahol a_w a varrat mérete. Ennek az értéke GMAW (CO₂ védőgáz, fogyóelektródás hegesztés) sarok varratokra

$$C_2 a_w^n = 0.3258 \cdot 10^{-3} a_w^2 \quad (L \text{ mm-ben}) \quad (61)$$

6. MEGBÍZHATÓSÁG ALAPÚ OPTIMALIZÁLÁS

A következő feltételezéseket kell figyelembe venni: (1) az általános konfigurációt, beleértve a minden tag hosszát, amelyek meg vannak adva egy rögzített (determinisztikus) módon; (2) a meghibásodási módok: a teljes horpadás, a helyi horpadás és maximális alakváltozása; (3) a terhelési vektort alkotó statikus terhelések nagyságai rendszertelenek, de a helyzetük determinisztikus; (4) a megengedhető feszültségek és elmozdulások véletlenszerűek, de pozíciójuk determinisztikus.

Abban az esetben, ha a határállapot függvény $g(\underline{x})$ lineáris függvénye normálisan elosztott alap véletlenszerű változóknak (\underline{x}), akkor a meghibásodás valószínűsége a lineáris biztonsági határral M írható fel:

$$P_F = P\{g(\underline{x}) \leq 0\} = P(M \leq 0) \quad (62)$$

amely csökkenti a normál eloszlásfüggvény értékét

$$P_F = \Phi(-\beta) \quad (63)$$

ahol β a megbízhatósági index, amely

$$\beta = \mu_M / \sigma_M \quad (64)$$

A megbízhatósági index geometriai értelmezése a legkisebb távolság a vonaltól (vagy a hipersíktól), amely a határt jelenti a biztonságos tartomány és a meghibásodási tartomány között. A tönkremenetel valószínűségének értékelése az egyszerű véletlenszerű változók átlagértékeinek és standard szórásainak egyszerű értékelésére korlátozódik.

Amikor a határállapot függvény nem lineáris a véletlenszerű változókra (\underline{x}), akkor a határállapot-függvény linearizálását a normalizált térben (\underline{u}) hibás felület tervezési pontján kell elvégezni (FORM-First Order Reliability Method),

$$u_i = (x_i - \mu_{x_i}) / \sigma_{x_i} \quad (65)$$

Mivel nem ismerjük előre a tervezési értéket, ezt iteratív módon kell megtalálni. Feltéve, hogy a határállapot függvény differenciálható, a következő egyszerű iterációs sémát kell követni:

$$\alpha_i = -\partial g(\beta \alpha) / \partial u_i \left[\frac{\sum_{j=1}^n \partial g(\beta \alpha)^2}{\partial u_i} \right] \quad (66)$$

$$G(\beta \alpha_1, \beta \alpha_2, \dots, \beta \alpha_n) \quad (67)$$

amely megadja a tervezési pontot (\underline{u}^*) és a megbízhatósági indexet β .

Altalánosságban elmondható, hogy szerkezeti tervezésre megengedhető meghibásodás valószínűsége nagyon alacsony. A rendszerint alkalmazott teljes tönkremeneteli valószínűségi megközelítések vagy a tökéletes statisztikai függőség feltételezésén (Cornell-féle alsó határ) vagy statisztikai függetlenségükön (Cornell-féle felső határ) alapul. Ezek a határok nagymértékben különböznek egymástól, mert a meghibásodási módok közötti korreláció nem szerepel a képletben. A Ditlevsen módszer [18], amely magában foglalja a statisztikai függőség hatását bármelyik két meghibásodási mód között, jelentősen csökkentette a rendszer meghibásodási valószínűségének határait.

A legfontosabb meghibásodási mód azonban a példákban dominánsnak bizonyult, a tönkremenetel valószínűségével társított fennmaradó határállapotok pedig nem relevánsak. A II. szintű módszerek (FORM, SORM (Second Order Reliability Method), amelyek másodrendű közelítést alkalmaznak) nem lehetnek pontosak, ha a határállapot függvény nem lineáris. Az eredményeket egy III. szintű eljárással erősítjük meg.

7. AZ OPTIMALIZÁLÁSI STRATÉGIA

7.1. Branch and Bound

A feladat nem lineáris, és a tervezési változók diszkrét. Tekintettel a diszkrét tervezési változók kis számára, az implicit „branch and bound” stratégiát alkalmazzuk, hogy megtaláljuk a legkisebb költségű megoldást. A két fő alkotóelem egy kombinatorikus fa, amelynek megfelelően definiált csomópontjai vannak, valamint a fa csomópontjaihoz kapcsolódó optimális megoldás felső és alsó határai. Ezen kívül lehetőség van arra, hogy számos lehetséges megoldást kizárjunk a számításból.

Három szintet vettünk fel a kombinatorikus fán. A bordák számát (n) rögzítettük a fa tetején, a fennmaradó szintek az alaplemez vastagság t_f és a borda vastagság t_s jelentik. Ehhez a vastagság értékeinek folytonos értékeknek kell lenniük. A harmadik szinten a kapott diszkrét minimális megoldás lesz a támpont megoldás (felső határ). A fa bármely levele aktív, aminek határa szigorúan kevesebb, mint a támpont. Egyébként pedig befejezettnek jelöli ezt az irányt, és nem kell tovább vizsgálni. A B&B fa addig fejlődik, míg minden levél vizsgálata befejeződik. Az alkalmazott elágazási stratégia az első, amely tartalmazza az alsó megkötéssel rendelkező csomópont kiválasztását.

A „branch and bound” stratégiát alkalmazzuk itt úgy, hogy az optimális megoldás egy meghatározott tűrésén belül számba vegyük az ε -optimum költségeket. Miután megtaláltuk az optimumot, meghatározunk egy maximális költséget, amely az új támpont lesz. Visszaugorva és javítva az új támpontnál minden alacsonyabb költségű levelet (alternatívát), a befejezett irányban történt vizsgálatok során ezen levelek lesznek az optimum közeli megoldások.

7.2. Optimalizálás folyamatos tervezési változókkal

Az egyes egyszerűbb feladatok (relaxed problem) folyamatos tervezési változókkal történő megoldása érdekében a költségek és feltételek egyidejű minimalizálását kell keresni. Ezeket a célfüggvényeket normalizált formába kell önteni. Ha egy referencia költség K_0 adott, akkor a célfüggvényeket a következő alakba írható fel,

$$g_1(n, t_f, t_s) = K(n, t_f, t_s) / K_0 - 1 \leq 0 \quad (68)$$

Egy másik célfüggvény a teljes horpadás megbízhatósági feltételéből adódik,

$$g_2(n, t_f, t_s) = \sigma(n, t_f, t_s) / \sigma_U - 1 \leq 0 \quad (69)$$

Több célfüggvény foglalkozik a helyi horpadással és az elcsavarodási kihajlással, a melyeket hasonló módon fejezünk ki. Az alakváltozási feltételből adódó megbízhatósági célfüggvény,

$$g_m(n, t_f, t_s) = f(n, t_f, t_s)_{\max} / f_0 - 1 \leq 0 \quad (70)$$

Ennek a Pareto optimalizálásnak az a célja, hogy fenntartsa a folyamatos tervezés töretlen fejlődését,

amelyet a konvex skaláris függvény korlátlan minimalizálásával lehet elérni:

$$F(t_f, t_s) = \frac{1}{\rho} \cdot \ln \left[\sum_{j=1}^m \exp \rho(g_j(t_f, t_s)) \right] \quad (71)$$

Ez az alak a cél és a kényszer határok konvex konzervatív megközelítéséhez vezet. ρ -val nő pontosság.

Az alkalmazott stratégia az explicit közelítési modellek egy iteratív sorozata, amelyet a lineáris meghatározás után az összes célfüggvény csonkított Taylor-sorának felírásával fogalmaztunk meg. Ebből következők:

$$\text{Min } F(t_f, t_s) = \frac{1}{\rho} \cdot \ln \left[\sum_{j=1}^3 \exp \rho(g_0(t_f, t_s) + \frac{\partial g_{0j}(t_f, t_s)}{\partial t} dt_s + \frac{\partial g_{0j}(t_f, t_s)}{\partial h} dt_s) \right] \quad (72)$$

Ennek a feladatnak van egy analitikus megoldása, amely a tervezési változókat dt_s és dt_f alakra változtatja. A g_{0j} adott számértékének megoldása a probléma megoldásának iterációját képezi (71). A tervezési változó változtatásaihoz a határértékek mozgását kell előírni, hogy biztosítsák a közelítések pontosságát. A tervezési változók kis számának köszönhetően analitikus megoldás áll rendelkezésre. Az iterációk során megnöveltük a ρ szabályozási paramétert, amelyet a jobb megoldás elérése érdekében nem szabad csökkenteni.

8. SZÁMPÉLDÁK

8.1. Egyirányban nyomott hosszirányban bordázott lemez

A kiinduló adatok a következők: alaplemez szélesség $B = 6000$ [mm], alaplemez hosszúság $L = 3000$ [mm], nyomóerő $N = 1.974 \times 10^7$ [N], anyag sűrűség $\rho = 7.85 \times 10^{-6}$ [kg/mm³], Young modulus $E = 2.1 \times 10^5$ [MPa], és a folyás határ $f_y = 355$ [MPa], a Poisson tényező 0.3. Ha a k_F/k_m arány nulla, akkor a gyártási költséget nem vesszük figyelembe, így akkor az optimum a tömeg minimum. Az ismeretlenek az alaplemez és borda vastagság, bordák száma, melyek a következő határok között változhatnak:

$$3 \leq t_f \leq 40 \text{ [mm]}; 3 \leq t_s \leq 12 \text{ [mm]}; 3 \leq \varphi \leq 10$$

A hagyományos határállapot tervezéssel (1. szintű megközelítés) összhangban az acél folyáshatára $f_y = 355$ MPa. Mivel 1.10 a szerkezeti acélra felvehető biztonsági tényező és 0.10 a felvett variációs tényező értéke, így ez 440 MPa átlagértéknek felel meg. A tervezési tényezővel változtatott terhelési intenzitás $p_0 = 0.0015$ N/mm² és a változó együtthatója 0.20. A véletlen változókra Gaussian eloszlást alkalmaztunk. A Young modulus véletlenszerűségét az egyszerűség kedvéért nem vettük figyelembe. A megadott (várható) hiba valószínűsége 10^{-4} (béta nagyobb, mint 3.72). A

determinisztikus megoldások is megbízhatóság-alapú optimális tervezések az egy határállapot dominálásának köszönhetően.

1. táblázat Optimumok és az 5%-nál közelebbi optimumok száma L-borda esetén

feszültség	t_f [mm]	t_s [mm]	φ	$k_F/k_m = \theta$	ε -megoldások
alsó	20	12	5	3403	13
felső	17	12	7	3106	8

2. táblázat Optimumok és az 5%-nál közelebbi optimumok száma L-borda esetén

feszültség	t_f [mm]	t_s [mm]	φ	$k_F/k_m = 1.5$	ε -megoldások
alsó	22	12	4	4488	6
felső	20	12	4	4097	5

3. táblázat Optimumok és az 5%-nál közelebbi optimumok száma trapézborða esetén

feszültség	t_f [mm]	t_s [mm]	φ	$k_F/k_m = \theta$	ε -megoldások
alsó	15	4	10	2454	2
felső	13	4	10	2123	2

4. táblázat Optimumok és az 5%-nál közelebbi optimumok száma trapézborða esetén

feszültség	t_f [mm]	t_s [mm]	φ	$k_F/k_m = 1.5$	ε -megoldások
alsó	15	4	10	3768	12
felső	13	4	10	3388	13

Az 1-4. táblázatok eredményeiből látható, hogy trapézborðás lemez gazdaságosabb (kb. 30% csak anyag, 16% teljes költség), habár találhatunk jobb megoldást L-bordára, amennyiben a t_s tartományát növeljük. A gyártási költség aránya L- bordára 24%, trapézborðára 36%. Az ε megoldások száma trapézborðás esetben ellentétesen változik, mint a L-borðás lemezek optimalizálásánál.

8.2. Síkban nyomott és keresztirányban terhelt hosszirányban bordázott lemez

A következő számításokban L- és trapézborðás lemezeket hasonlítottunk össze. A kiinduló adatok a következők: alaplemez szélesség $B = 4000$ [mm], alaplemez hosszúság $L = 6000$ [mm], nyomóerő $N = 1.974 \times 10^7$ [N]. A Young modulus $E = 2.1 \times 10^5$ [MPa], az anyag sűrűség $\rho = 7.85 \times 10^{-6}$ [kg/mm³]. A számításban különböző értékeket kap a felületi nyomás $p_0 = 0.005, 0.01, 0.02$ [MPa] és a folyáshatár $f_y = 255, 355$ [MPa]. Az ismeretlenek az alaplemez és borda

vastagság, bordák száma, melyek a megkövetkező határok között változhatnak.

$$3 \leq t_f \leq 40 \text{ [mm]}; \quad 3 \leq t_s \leq 12 \text{ [mm]}; \quad 4 \leq \varphi \leq 10$$

5. táblázat Optimumok és az 5%-nál közelebbi optimumok száma L-borda esetén

feszültség	terhelés	t_f [mm]	t_s [mm]	φ	$k_F/k_m = \theta$	ε -megoldások
alsó	alsó	23	10	6	5334	12
alsó	felső	24	12	6	5963	8
felső	alsó	21	12	5	4895	16
felső	felső	23	12	6	5506	6

6. táblázat Optimumok és az 5%-nál közelebbi optimumok száma L-borda esetén

feszültség	terhelés	t_f [mm]	t_s [mm]	φ	$k_F/k_m = 1.5$	ε -megoldások
alsó	alsó	26	9	5	6914	17
alsó	felső	28	12	4	7669	11
felső	alsó	26	8	3	5908	2
felső	felső	30	12	3	7280	9

7. táblázat Optimumok és az 5%-nál közelebbi optimumok száma trapézborða esetén

feszültség	terhelés	t_f [mm]	t_s [mm]	φ	$k_F/k_m = \theta$	ε -megoldások
alsó	alsó	18	9	5	4704	10
alsó	felső	17	11	5	5122	8
felső	alsó	15	8	6	3928	8
felső	felső	15	10	6	4494	9

8. táblázat Optimumok és az 5%-nál közelebbi optimumok száma trapézborða esetén

feszültség	terhelés	t_f [mm]	t_s [mm]	φ	$k_F/k_m = 1.5$	ε -megoldások
alsó	alsó	22	8	5	5932	19
alsó	felső	23	9	4	6437	7
felső	alsó	17	8	5	5215	11
felső	felső	20	10	4	5962	15

Ugyanazokat a feltételezéseket alkalmaztuk, mint az előző példában, hogy megtaláljuk a megbízhatóság-alapú optimumot.

Az eredmények összefoglalva láthatóak az 5-8. táblázatokban. Az optimumot félkövér számmal jelöltük. Az eredmények azt mutatják, hogy a trapézborðás lemez gazdaságosabb. A költség megtakarítás 14 %-tól (alacsony folyáshatár és minimális felületi nyomás) 18%-ig (magas folyáshatár

és maximális felületi nyomás) jelentkezett. A magasabb folyáshatárú anyagok adták az olcsóbb eredményeket. Általánosságban elmondható, hogy az anyag és a költség minimum különböző, és a hegesztési költség hatása miatt a költség minimumnál kisebb a bordák száma.

9. Köszönetnyilvánítás

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

10. Irodalomjegyzék

- [1] FARKAS, J., JÁRMAI, K.: Analysis and optimum design of metal structures. Balkema, Rotterdam-Brookfield (1997).
- [2] FARKAS, J., JÁRMAI, K.: Economic design of welded steel structures. J. Constructional Steel Research 46 Nos.1-3. 35-36. Full paper on CD-ROM. Paper No.142 (1998).
- [3] VIRÁG Z, JÁRMAI K.: Parametric studies of uniaxially compressed and laterally loaded stiffened plates for minimum cost, International Conference on Metal Structures (ICMS), Millpress, Rotterdam:237-242, 2003.
- [4] JÁRMAI, K., FARKAS, J., SIMOES, L. M. C., VIRÁG, Z.: Minimum cost design of longitudinally stiffened welded plates loaded by eccentric compression, In Proceedings of the Third European Conference on Steel Structures, Coimbra (2002).
- [5] FARKAS J, SIMOES MC, JÁRMAI K: Minimum cost design of a welded stiffened square plate loaded by biaxial compression, Structural and Multidisciplinary Optimization; 29 (4): 298-303 (2005).
- [6] JÁRMAI, K., FARKAS, J., HORIKAWA, K.: Economic design of steel bridge decks. Welding in the World 41. No.1. 49-59, (1998).
- [7] SIMÕES, L. M. C., JÁRMAI, K., FARKAS, J.: Minimum cost design of uniaxially compressed plates with welded trapezoidal stiffeners considering a reliability constraint. In Metal Structures - Design, Fabrication, Economy, ed. Karoly Jarmai & Jozsef Farkas, 209- 216. ISBN: 90-77017-75-5. Rotterdam: Millpress Rotterdam (2003).
- [8] SIMÕES, L. M. C., FARKAS, J., JÁRMAI, K.: Reliability-based optimum design of a welded stringer-stiffened steel cylindrical shell subject to axial compression and bending, Structural and Multidisciplinary Optimization 31, 2: 147 – 155 (2006).
- [9] SIMÕES, L. M. C., FARKAS, J., JÁRMAI, K.: Optimization of a Cylindrical Shell Housing a Belt-conveyor Bridge, Computers and Structures 147, 159 – 164, (2015).
- [10] SIMÕES, L. M. C., FARKAS, J., JÁRMAI, K.: Optimization of Orthogonally Stiffened Plate Considering Fatigue Constraints. In Design, Fabrication and Economy of Welded Structures, ed. Karoly Jarmai and Jozsef Farkas, 27 - 34. ISBN: 978-1-904275-28-2. Horwood Publishing (2008).
- [11] MIKAMI I, NIWA K.: Ultimate compressive strength of orthogonally stiffened steel plates. J. Struct. Engng ASCE; 122 (6): 674-682, (1993).
- [12] COSTCOMP Programm zur Berechnung der Schweisskosten. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf, (1990).
- [13] FARKAS, J., JÁRMAI, K.: Optimum design of a stiffened conical roof considering the residual welding distortions. Welding in the World 43 No.5. 54-59, (1999).
- [14] HASOFER A.M., LIND N.C.: Exact and invariant second moment code format, J.Eng. Mech Div. 100 (1), 111-121, (1974).
- [15] Stahlbau Handbuch Band 2. Köln, Stahlbau-Verlag, (1985).
- [16] EUROCODE 3: Design of steel structures. Part 1.1. General rules and rules for buildings. European Prestandard ENV 1993-1-1. CEN European Committee for Standardisation, Brussels, (1992).
- [17] PAIK JK, THAYAMBALLI AK, KIM BJ.: Large deflection orthotropic plate approach to develop ultimate strength formulations for stiffened panels under combined biaxial compression/tension and lateral pressure. Thin-Walled Structure; 39: 215-246 (2001).
- [18] DITLEVSEN, O.: Narrow reliability bounds for structural systems, J.Struct. Mech, 7 (4), 453-472, (1979).

VÉKONYFALÚ HEGESZTETT SZERKEZETEK KÖLTSÉGSZÁMÍTÁSA KÜLÖNBÖZŐ GYÁRTÁSI TECHNOLÓGIÁKKAL

COST CALCULATION OF THIN-WALLED WELDED STRUCTURES USING DIFFERENT FABRICATION TECHNOLOGIES

Dr. Jármai Károly*

ABSTRACT

In this paper the cost calculation of welded steel structures is shown. This calculation is established on the fabrication time of the given technology. Considering several welding and cutting technologies, painting and surface preparation, one can calculate the optimum sizes, dimensions of the structure. We have considered some newer cutting and welding technologies, like laser, plasma, waterjet. For the optimization the Generalized Reduced Gradient technique was used. We have shown the optimization on a compressed stiffened steel plate, considering the overall and the local buckling constraints.

1. BEVEZETÉS

Amikor optimaljuk a szerkezetet, fontos a költségek kiszámítása. Ezek a költségszámítások részben anyagköltségen alapulnak és azon gyártási költségekre korlátozódnak, amelyek közvetlenül hatnak a szerkezet méretére, kialakítására vagy alakjára. A költségfüggvény magában foglalja az anyag, az összeszerelés, a hegesztés, a felületek előkészítésének, festésének, vágásának, továbbá a leélezésnek, a gyártási sorrendnek megfelelően kialakított költségeit. Egyéb költségeket, mint például az amortizációt, a beruházásokat, a szállítást, a karbantartást nem számoljuk ebben a rendszerben. Hozzávetőlegesen meg tudjuk adni a tervezési és felülvizsgálati költségeket is, de a legtöbb esetben ezek arányosak a szerkezet súlyával. A költségszámítás a technológiai időből történik, amely adatok a világ minden tájáról, különböző cégektől származnak. Ha ugyanazt a szerkezetet-tervezési feladatot hasonlítjuk össze különböző országokban, akkor figyelembe kell vennünk a munkaerő költségek közötti különbségeket. Ennek van a legnagyobb hatása a szerkezetre, ha a technológia ugyanaz. Ez a tanulmány bemutatja néhány újabb hegesztési és vágási technológia költségszámítását is, mint például a lézer-, a plazma-, a vízsugaras vágás, a

lézer hegesztés stb. Ezek a költségek a szerkezet optimalizálás célfüggvényei. Ha figyelembe vesszük a tervezés és a gyártási technológia kölcsönhatását, nem szabad elfelejtenünk a gazdaságosságról, mint a szerkezet harmadik fontos jellemzőjéről. Ez a három oldal együtt segítenek abban, hogy megtaláljuk a legjobb megoldást.

2. KÖLTSÉGELEMEK

Egy szerkezet költségfüggvénye magában foglalhatja az anyag, az összeszerelés költségeit, a különböző gyártási költségeket, mint például a hegesztési, a felületkészítési, a festési, a vágási, a leélezési stb. költségeket, mint ahogy több cikkben bemutatták ennek többféle megközelítését, mint például Klansek & Kravanja [1], Jalkanen [2], Tímár és mtsai. [3], Farkas & Jármai [4, 5, 6]. A nagy szilárdságú acél esetén Mela & Heinisuo [7], kompozitokra a Cost stúdióban [8] és Kovács & Farkas [9] cikkben.

2.1 Az anyagköltség

Acél esetében a fajlagos anyagköltség $k_M = 1,1-1,5$ \$/kg, az alumíniumnál $k_M = 3,2-3,8$ \$ / kg, rozsdamentes acél esetén $k_M = 6,2-7,3$ \$ / kg a vastagságtól függően.

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

K_M [kg] az anyagköltség, V [mm³] a szerkezet térfogata, az anyag sűrűsége. Acél esetében $7,85 \times 10^{-6}$ kg/mm³, alumínium esetén $2,7 \times 10^{-6}$ kg/mm³, rozsdamentes acél $7,78 \times 10^{-6}$ kg/mm³. Ha több különböző anyagot használunk, akkor különböző anyagköltség tényezőket lehet egyszerre használni az egyenletekben.

2.2 A gyártási költség általában

A gyártási költség arányos a gyártási idővel és a munkaerő költséggel, amely országonként különbözik.

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

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

ahol K_F [\$] a gyártási költség, k_F [\$/min] a fajlagos gyártási költség tényező, T_i [min] a gyártási idő. Feltételezzük, hogy a k_F értéke egy adott gyártó számára állandó. Ha nem így van, lehetséges különböző gyártási költség tényezők egyidejű alkalmazása az egyenletben.

2.3 A hegesztési munkálatok ideje

A hegesztéssel kapcsolatos főbb időintervallumok a következők: előkészítés, összefűzés, tényleges hegesztési idő, elektróda csere, salakolás és köszörülés.

Az előkészítés és az összeszerelés ideje kiszámítható az alábbi közelítő képlet segítségével [10]

$$T_{w1} = C_1 \Theta_{dw} \sqrt{\kappa \rho V} \quad (3)$$

ahol C_1 a hegesztési technológiától függő paraméter (általában 1), a Θ_{dw} nehézségi tényező, κ az összeszerelhető szerkezeti elemek száma. A nehézségi tényező a struktúra összetettségét fejezi ki. A nehézségi tényező értékek függenek a szerkezettől (síkbeli, térbeli), az elemek típusától (lemezes, csőszerű). A javasolt értéktartomány 1-4 között van [11].

A tényleges hegesztési idő függ a varrat méretétől a_{wi} , a hegesztés hosszától L_{wi} és a hegesztési technológiától C_{2i} .

A C_2 nemcsak a hegesztési technológiák közötti különbségeket tartalmazza, hanem a pozicionális (függőleges, fejeletti) és a normál hegesztés (downhand pozícióban) közötti időbeli különbséget is [12, 13, 14]. Számos dokumentum áll rendelkezésre az interneten a hegesztési sebesség kiszámításához [15, 16], a hegesztési idő számításához. A valódi hegesztési idő közelítőleg kiszámítható a következő módon

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

1. táblázat Hegesztési idők T_{w2} (min/m) a varratméret a_w (mm) függvényében sarokvarratokra downhand pozícióban.

Hegesztési technológia	a_w [mm]	$10^3 T_{w2}$
SMAW	1-6	$0.7889 a_w^2$
SMAW HR	1-6	$0.5390 a_w^2$
GMAW-CO ₂	1-6	$0.3394 a_w^2$
GMAW-MIX	1-6	$0.3258 a_w^2$
FCAW	1-6	$0.2302 a_w^2$
FCAW-MC	1-6	$0.4520 a_w^2$
SSFCAW (ISW)	1-6	$0.2090 a_w^2$
SAW	1-6	$0.2349 a_w^2$
Laser	1-6	$1/(9.44-4.03 a_w^{0.5})$
GTAW (TIG)	1-6	$1/(-0.012+1.079/a_w^{1.5})$

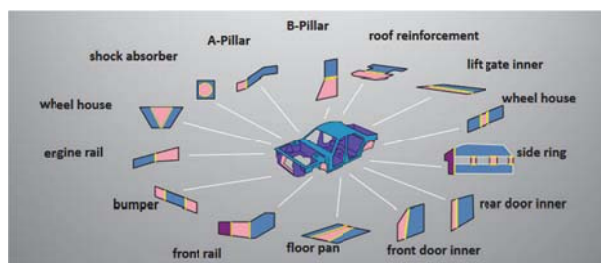
A technológiák rövidítései a következők:

SMAW = Bevont elektródás kézi ívhegesztés,
 SMAW HR = Bevont elektródás kézi ívhegesztés, mélybeolvadású,
 GMAW-CO₂ = Védőgáz ívhegesztés CO₂-vel,
 GMAW-MIX = Védőgáz ívhegesztés kevert gázzal,
 FCAW = Porbeles ívhegesztés,
 FCAW-MC = Fémhuzalos ívhegesztés,
 SSFCAW (ISW) = Porbeles önvédő ívhegesztés,
 SAW = Fedőporos ívhegesztés,
 GTAW/TIG = Wolfram elektródás védőgáz ívhegesztés,
 Laser = Lézeres hegesztés,

A lézeres hegesztés spektruma kiterjed a mélybeolvadású hegesztésre is. A nagy teljesítmény lehetővé teszi a koncentrált energiabevitel elérését, a nagy hegesztési sebességet, valamint jelentősen csökkentett hőhatás övezetet és vetemedést. Az ívhegesztéshez képest sokkal szélesebb anyagválasztékot tesz lehetővé a hegesztésnél, és akár 20 mm anyagvastagság is egybe hegeszthető.

Ha más hegesztési folyamathoz hasonlítjuk, a lézeres hegesztésnek van néhány hasonlósága, valamint néhány egyedi tulajdonsága, mint például a GTAW hegesztésnek. A lézeres hegesztés fúziós folyamat, amelyet semleges védőgáz mellett végeznek, ahol a töltőanyagot leginkább hozzáadják. Az elektronsugaras hegesztéshez hasonlóan a lézeres hegesztés nagy energiasűrűségű, ahol az energia közvetlenül a munkadarabra irányul. A lézer különbözik mind a GTAW, mind az EB (elektronsugaras) hegesztéstől, mivel nem igényli, hogy a munkadarab elektromos áramkörben legyen. Mivel az elektronsugaras hegesztést vákuumkamrában kell végrehajtani, a lézeres hegesztés szinte mindig költségelőnyt kínál az EB-vel szemben.

Az impulzusos lézeres hegesztés egyik legnagyobb előnye a minimális hőmennyiség, amelyet hozzáadnak a feldolgozás során. A gerenda ismételt "lüktetése" lehetővé teszi az egyes "spot" varratok közötti hűtést, ami nagyon kicsi "hőhatás zónát" eredményez. A lézeres hegesztés ideális olyan vékony lemezeknél, vagy termékeknél, amelyeknél az elektronika vagy az üveg-fém tömítések hegesztést igényelnek. Alacsony hőteljesítmény, kombinálva egy optikai (nem elektromos) eljárással, nagyobb rugalmasságot jelent a szerszámok tervezésénél és anyagainál is.



1. ábra Lézer alkalmazás autóiipari lemez hegesztésnél

A lézeres hegesztés sebessége a lézerberendezés típusától függ: CO₂, YAG, Fiber, Disc és a lézer

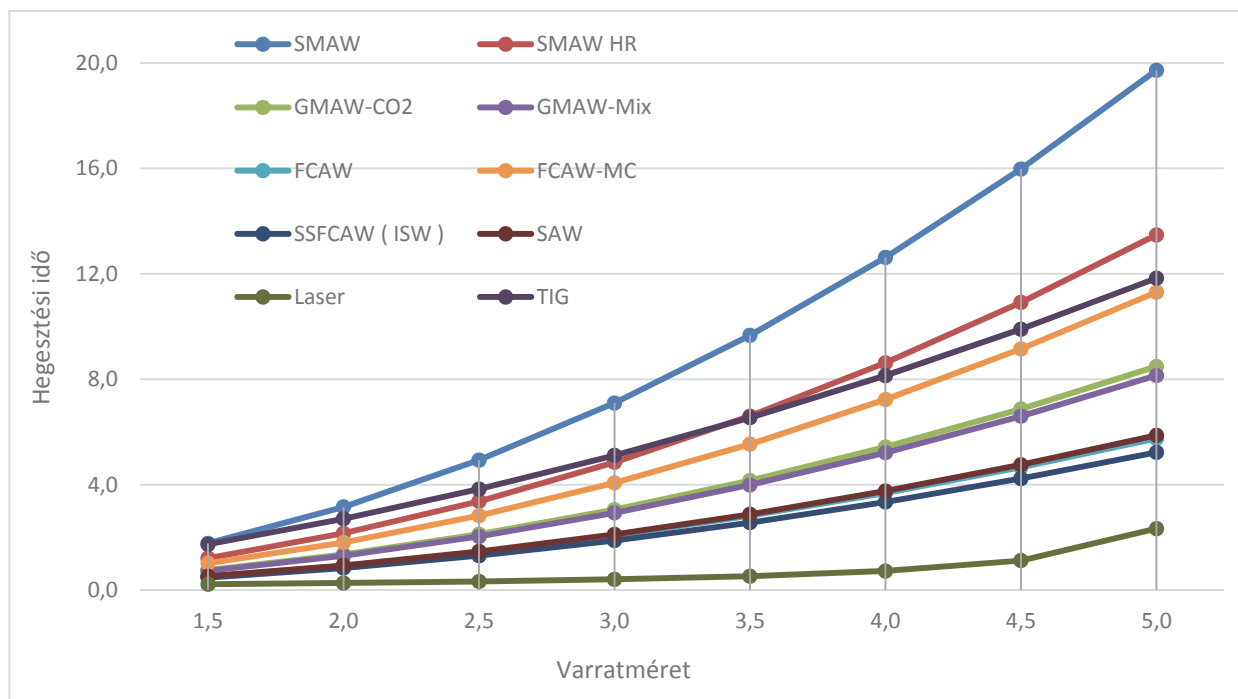
kapacitásától [17, 18]. A lézer alkalmazhatósága az autoiparban az 1. ábrán látható.

A TableCurve 2D szoftver használatával a hegesztési sebességekről összegyűjtött adatok alapján megállapítottuk a hegesztési idő közelítését a hegesztési technológia és a hegesztett lemez vastagságának függvényében. Az új technológiák a lézer és a TIG/GTAW, amint azt a 2. ábra mutatja. Látható, a

leglassabb hegesztési technológia a SMAW = bevont elektródás kézi ívhegesztés és a leggyorsabb a lézer (ha nem tekintjük a beruházási költségeket).

További gyártási műveletek számítása

Vannak további gyártási műveletek, mint például az elektród cseréje, salakolás stb.



2. ábra. Hegesztési idő T_{w2} (min/m) a varratméret a_w (mm) függvényében sarokvarratokra downhand pozíció esetén

Ennek az időnek a közelítése a következő

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

Ez arányos T_{w2} -vel. Ez közelítőleg 30%-a a hegesztési főidőnek. A két időelem együtt a következő:

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

A hegesztési idő $\frac{1}{2}V$, V, K és X varratok esetén különböző.

2.4 Láng- és vízsugaras vágás

A négy leggyakrabban használt nem érintkező fémvágási módszer az oxigén-éghetőanyag gáz, a plazma, a lézer és a nagynyomású víz. Az első három vágási folyamat termikus jellegű, míg a vízsugaras vágás módszer csiszoló erózióval működik. Ezt a négy folyamatot elsősorban precíziós külső és belső vágások készítésére használják síklemezen és lemezanyagban.

Lemez vágási és élcsiszolási idők

Az oxigén gázvágása, általában acetilén gázzal volt az egyetlen módja a termikus vágásnak. Az oxigéntartalmú lángnak előmelegítő hatása van, amely a szénacélt kb. 480 °C-os "füstölési hőmérsékletre" melegíti. Ez az acél és az oxigén közötti gyors égési reakciót eredményezi. Az így kapott olvadt anyagot vagy salakot az oxigén vágásárammal átfúvatjuk a fémén, viszonylag sima és szabályos vágást biztosítva.

A vágás és a leélezés különböző technológiákkal, például acetilénnel, stabilizált gázkeverékkel és propánnal, normál és nagy sebességgel állítható elő.

A vágási költség függvényt a vastagság (t [mm]) és a vágási hossz (L_c [mm]) függvényében alakíthatjuk ki. A paramétereket Farkas, Jármay (2008) könyvben lehet megtalálni:

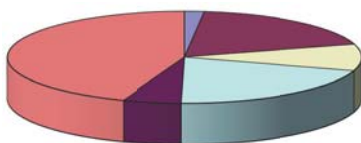
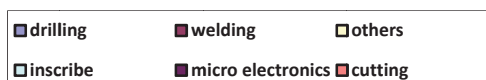
$$T_{CP} = \sum_i C_{CPi} t_i^n L_{ci} \quad (7)$$

ahol t_i vastagsága [mm], L_{ci} a vágási hossz [mm]. Az n kitevő értéke a függvény-illesztési számításokból származik.

A termikus folyamatok és az oxigén-éghető anyag gáz vágási folyamata két hátránnyal jár. Először is, a hő megváltoztatja a fém szerkezetét a "hőhatás övezetben"

a vágás mellett. Ez a vágás szélén bizonyos anyag tulajdonságokat lecsökkent, előkezelést vagy utólagos vágást igényel. Másodsor, a tűrések kevésbé pontosak lehetnek, mint egy megmunkált vágásnál, kivéve a lézeres vágást.

A lézervágás meglehetősen új technológia, amely lehetővé teszi a fémek és egyes nemfémek anyagok kivágását rendkívüli pontossággal, ha szükséges. A lézersugár jellemzően 0,2 mm átmérőjű, 1-2 kW teljesítményű. A lézervágás során a nagy sűrűségű fényenergia gerincét a fűvóka apró lyukán keresztül fókuszálják. Amikor ez a fény a munkadarab felületére ütközik, a munkadarab anyagát azonnal felolvasztja. A lézerek olyan anyagoknál használhatók leghatékonyabban, mint a szénacélok és a rozsdamentes acélok. Az olyan fémeket, mint az alumínium és a réz ötvözetek, nehezebb lézerrel vágni, mivel képesek tükrözni a lézerfényt, valamint a hővezetésük nagy. A lézer alkalmazásának eloszlása a különböző gyártási folyamatoknál a 3. ábrán látható. A lézervágás a leggyakoribb alkalmazás [19, 20].



3. ábra. A lézer alkalmazások megoszlása különböző megmunkálási technológiáknál

A vízsugaras vágó egy nagyon nagy nyomású vízsugárral, vagy a víz és egy csiszolóanyag keverékével képes különféle anyagokat vágni [21].

2.5 Acél plazma vágása

A plazmavágás rendkívül magas hőmérsékletet, nagy sebességű ionizált gázt használ a fém vágásához. A plazma hőmérséklete körülbelül 5500 °C és 28 000 °C között mozog. A plazmabevonatos anyagtól függően az alkalmazott gázok: szabványos sűrített levegő, oxigén, argon és hidrogén, vagy nitrogén és hidrogén. A gázzárst levegővel, vízzel vagy széndioxiddal végezzük.

A különböző vágási technológiák vágási ideje a 2. táblázatban látható. A közelítéseket számos adat és a TableCurve2D szoftver segítségével számítottuk ki. Az idő min/m-ben, a t lemezvastagság és az a_w (egyoldali hegesztésnél) hegesztési mérete ($a_w = 0,7 t$) mm-ben.

2. táblázat. Lemezek vágási ideje, T_{CP} (min/mm) a varratméret a_w (mm) függvényében hosszirányú sarok-, T-, V-, 1/2 V varrat esetén

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	$(0,447+0,384 \ln(t^2))^2$

A 4. ábra a különböző technológiák vágási idejét mutatja összehasonlítás céljából. Az idő min/m, az a_w a varrat mérete mm-ben. Látható, hogy a lézer, a plazma és a vízsugaras technológiák a leggyorsabbak vékony lemezeknél (~ 1 mm) és vastagabb lemezeknél (~ 5-6 mm-nél) a lézervágás, és a nagy sebességű acetilén vágás a leggyorsabb.

2.6 Felületelőkészítési idő

A felületi előkészítés a felület tisztítását, homokszórását stb. jelenti. A felület tisztítási időt a felület nagysága (A_s [mm²]) alapján a következőképpen határozhatjuk meg:

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

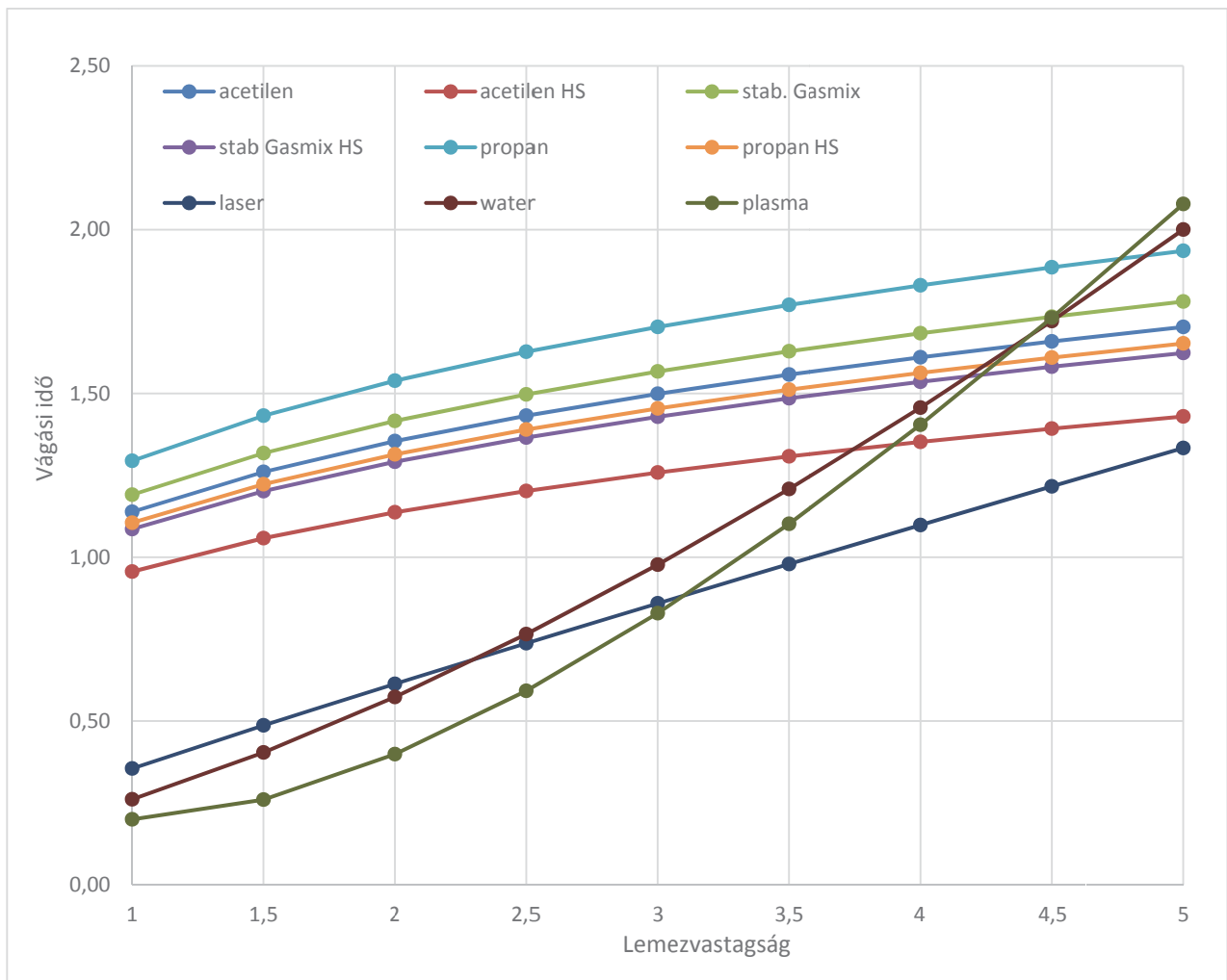
ahol a paraméter $a_{sp} = 2 \times 10^{-6}$ min/mm², Θ_{ds} a nehézségi tényező.

2.7 Festési idő

A festésnél alapozó és fedőfestéket vettünk figyelembe. A festési idő függ a festett felület nagyságától (A_s [mm²]) a következő módon:

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

ahol az alapozó festék paramétere $a_{gc} = 2 \times 10^{-6}$ min/mm², a fedőfesték paramétere $a_{tc} = 2.85 \times 10^{-6}$ min/mm², Θ_{dp} a nehézségi tényező. $\Theta_{dp} = 1,2$ vagy 3 vízszintes, függőleges és fejfeletti festés esetén.



4. ábra. Lemezvágási idő, T_{CP} (min/m) a lemezvastagság t (mm) függvényében hosszirányú sarok-, T-, V-, 1/2 V varrat esetén

2.8 Összköltség

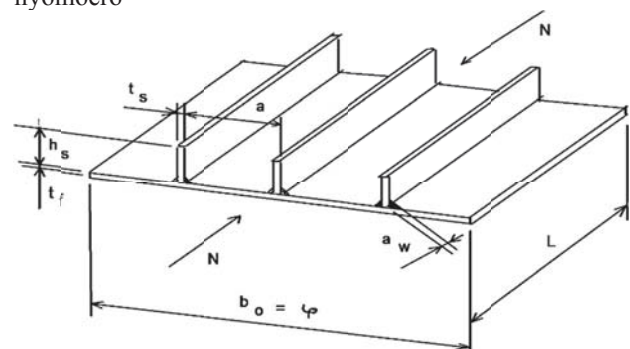
Az összköltség tartalmazza az előbb ismertetett idő és költségelemeket.

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

Acél esetén a fajlagos anyagköltség $k_M = 1,0 - 1,3$ \$/kg. K_F [\$] a gyártási költség, k_F [\$/min] a megfelelő gyártási költség tényező $k_F = 0 - 1$ \$/min, T_i [min] a gyártási idő. Feltételezzük, hogy a k_F értéke egy adott gyártó számára állandó. A k_F/k_M arány 0-2 kg/min. Ha $k_F/k_M = 0$, akkor megkapjuk a minimális tömeget. Ha $k_F/k_M = 2,0$ az nagyon magas munkaköltséget jelent (Japán, USA), $k_F/k_M = 1,5$ és $1,0$ a nyugat-európai munkaerőköltséget, a $k_F/k_M = 0,5$ a fejlődő országok munkaerőköltségét jelenti. Még ha a termelési arány hasonló is ezekben az esetekben, a különböző munkaerőköltségek miatti költségek közötti különbség jelentős.

3. BORDÁZOTT LEMEZEK OPTIMÁLÁSA

A költségoptimalás egy hegesztett bordázott lemezen kerül bemutatásra. A lemez merevítőket a fedőlemeze hegesztették kétoldali sarokvarrattal. Az acél rugalmassági modulusa $E = 2,1 \times 10^5$ MPa, az anyag sűrűsége $= 7,85 \times 10^{-6}$ kg/mm³, a Poisson aránya $\nu = 0,3$, a folyáshatár $f_y = 235$ MPa, a lemez szélessége $b_0 = 1500$ mm, hosszúsága $L = 1500$ mm. Az axiális nyomóerő



5. ábra. Nyomásnak kitett bordázott lemez

$$N = f_y b_0 t_{fmax} / 10 = 235 \times 1500 \times 5 / 10 = 1.7625 \times 10^5 \text{ [N]}$$

A változók, melyeket optimalni kívánunk a következők (5. ábra): az alaplemez falvastagsága t_f , a merevítő borda magassága és vastagsága h_s és t_s és a merevítő bordák száma $\varphi = b_0/a$.

A kihajlási feltétel a következőképpen írható fel

$$N \leq \chi f_y A \quad (11)$$

ahol a kihajlási tényező χ a redukált karcsúság $\bar{\lambda}$ függvényében a következő

$$\chi = 1 \quad \text{for} \quad \bar{\lambda} \leq 0.5 \quad (12a)$$

$$\chi = 1.5 - \bar{\lambda} \quad \text{for} \quad 0.5 \leq \bar{\lambda} \leq 1 \quad (12b)$$

$$\chi = 0.5/\bar{\lambda} \quad \text{for} \quad \bar{\lambda} \geq 1 \quad (12c)$$

ahol

$$\bar{\lambda} = \frac{b_0}{t_f} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)f_y}{E\pi^2 k}} \quad (13)$$

$$k = \min(k_R, k_F); \quad k_R = 4\varphi^2 \quad (14)$$

$$k_F = \frac{(1+\alpha^2)^2 + \varphi\gamma}{\alpha^2(1+\varphi\delta_p)} \quad \text{ha} \quad \alpha = \frac{L}{b_0} \leq \sqrt[4]{1+\varphi\gamma} \quad (15)$$

$$k_F = \frac{2(1+\sqrt{1+\varphi\gamma})}{1+\varphi\gamma} \quad \text{ha} \quad \alpha \geq \sqrt[4]{1+\varphi\gamma} \quad (16)$$

$$\delta_p = \frac{h_s t_s}{b_0 t_f}; \quad \gamma = \frac{EI_s}{b_0 D}; \quad I_s = \frac{h_s^3 t_s}{3}$$

$$D = \frac{Et_f^3}{12(1-\nu^2)} \quad (17)$$

$$\text{így} \quad \gamma = 4(1-\nu^2) \frac{h_s^3 t_s}{b_0 t_f^3} = 3.64 \frac{h_s^3 t_s}{b_0 t_f^3} \quad (18)$$

I_s egy merevítő inercianyomatéka, D az alaplemez hajlítási merevsége.

A lemez merevítő helyi horpadási feltétele az EC+ határkarcsúsága alapján

$$\frac{h_s}{t_s} \leq \frac{1}{\beta_s} = 14 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (19)$$

A számítási eredményeket a 3. táblázat mutatja.

4. OPTIMÁLÓ MÓDSZER ÉS EREDMÉNYEK

Az általánosított redukált gradiens módszer a célfüggvény gradiensét vagy lejtését vizsgálja, mivel a bemeneti értékek (vagy független változók) megváltoznak, és megállapítja, hogy optimális megoldást ért el, ha a részleges származékok nulla értéket képviselnek. A ÁRG módszer alapkonceptiója: a nemlineáris célfüggvény és méretezési feltételek linearizálását végzi el a Taylor sor egyenletével.

Ezután a redukált gradiens módszert alkalmazzuk, amely a változókészletet az alap és a nem-alapvető változó két alcsoportjára osztja, valamint az implicit változó elimináció fogalmát, hogy az alapváltozót a nem-alapvető változóval fejezze ki. Végül a feltételek megszűnnek, és a változó tér csak a nem alapváltozókra kerül levezetésre. A feltétel nélküli NLP-problémák bizonyított hatékony módszere a közelítő probléma megoldásához járul hozzá, majd a legközelebbi optimális megoldást találja meg a közeledő probléma megoldására. A folyamat ismétlődik, amíg el nem éri az optimális célfüggvényt és méretezési feltételeket.

A hátránya, hogy az algoritmussal meghatározott megoldás nagymértékben függ a kezdeti körülményektől, és nem mindig éri el a globális optimumot. A megoldó valószínűleg a kezdeti feltételekhez legközelebbi helyi optimális értéknél fog megállni, és lokális megoldást ad.

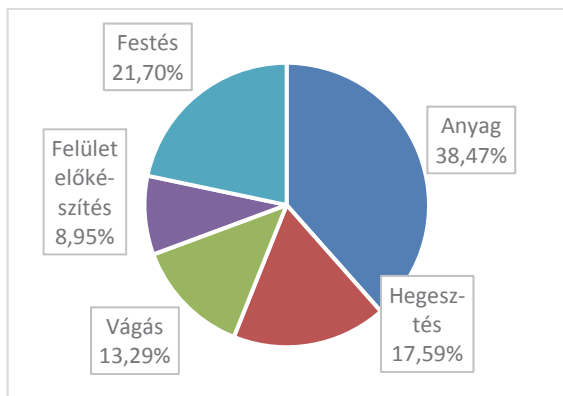
Ha különböző kezdeti körülmények között többször is elindítjuk a számítást, akkor sokkal nagyobb az esélye, hogy a megoldás a globális optimum lesz. Az algoritmus egy véletlenszerűen elosztott populációt hoz létre a kezdeti értékekből, mindegyiküket a hagyományos GRG nemlineáris algoritmus segítségével értékeli.

A optimumok a 3. táblázatban láthatók, figyelembe véve a lézerhegesztést és a lézeres vágást a k_F/k_M különböző értékeire.

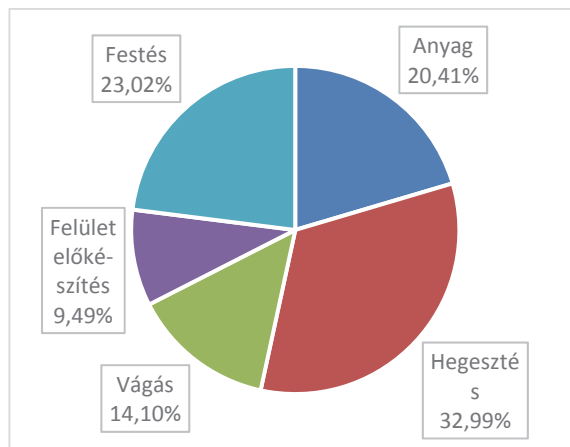
3. táblázat. Optimumok különböző költségarányokra

k_F/k_M	0	1	2
t_f	2,000	2,167	2,167
h_s	32,617	33,588	33,588
t_s	2,330	2,399	2,399
φ	6,000	5,000	5,000
Total cost	40,7	111,8	180,6
Mass	40,7	43,0	43,0
Welding	0,0	19,7	39,3
Cutting	0,0	14,9	29,7
Surface cleaning	0,0	10,0	20,0
Painting	0,0	24,3	48,5

A 6. és 7. ábrák mutatják a költségeloszlást $k_F/k_M = 1$ és 2 költségarány esetén lézer hegesztés és lézer vágás mellett.

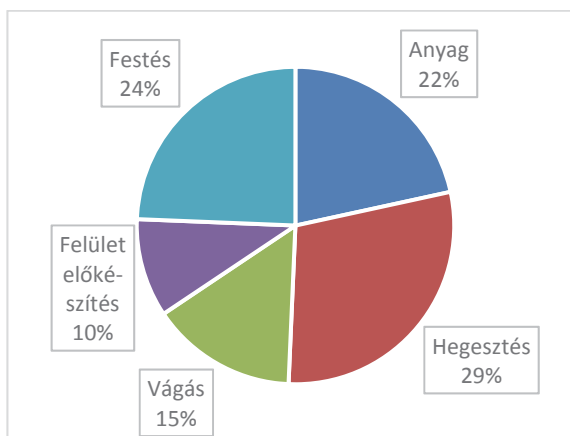
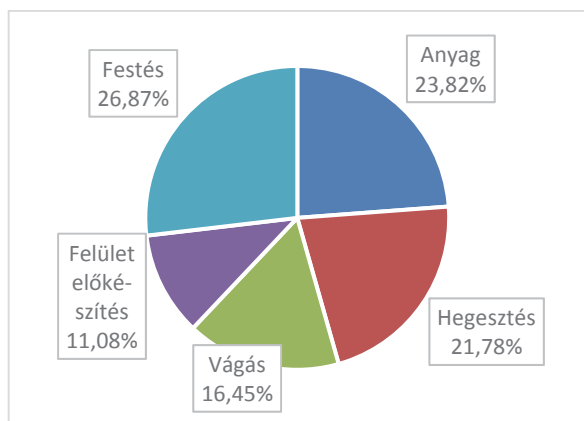


6. ábra. Költség eloszlás $k_f/k_m=1$ esetén, lézer hegesztés, lézer vágás esetén



9. ábra. Költség eloszlás $k_f/k_m=2$ esetén, GMAW CO₂ hegesztés, lézer vágás esetén

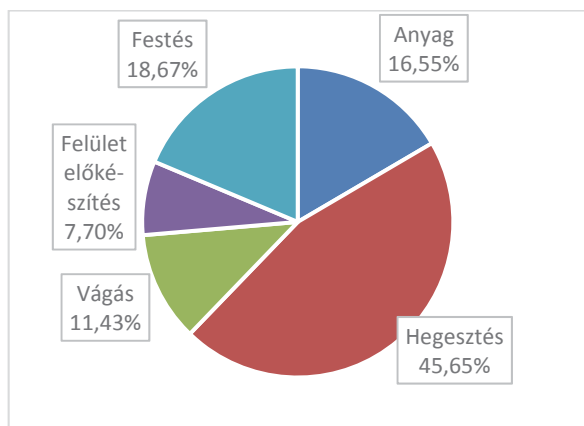
A 8 - 10 ábrák mutatják a költség eloszlást $k_f/k_m=2$ esetén, SMAW, GMAW CO₂ és SAW hegesztés és lézer vágás mellett. Bevontelektrodás kézi évhegesztés esetén (SWAW) a hegesztési költség sokkal nagyobb a nagyobb hegesztési idő miatt. Ez eléri a 46%-át az összköltségnek, összehasonlítva a lézer hegesztéssel, amikor csak 22%, valamint a GMAW CO₂ hegesztéssel, amikor 33% és a fedőporos hegesztésnél (SAW) 29%.



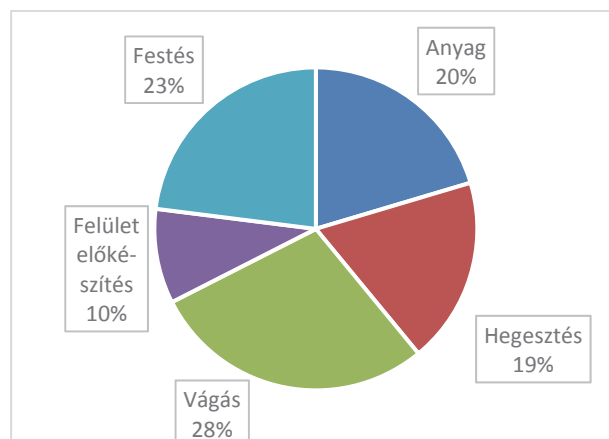
10. ábra. Költség eloszlás $k_f/k_m=2$ esetén, SAW hegesztés, lézer vágás esetén

7. ábra. Költség eloszlás $k_f/k_m=2$ esetén, lézer hegesztés, lézer vágás esetén

A vágási költség szintén jelentősen változik függően a technológiától. A lézer vágásnál a vágási költség az összköltség 16%-a, míg normál sebességű acetilén vágás esetén 28% (7, 11 ábrák).



8. ábra. Költség eloszlás $k_f/k_m=2$ esetén, SMAW hegesztés, lézer vágás esetén



11. ábra. Költség eloszlás $k_f/k_m=2$ esetén, lézer hegesztés, acetilén vágás esetén

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány leírja, hogyan kell kiszámítani hegesztett szerkezetek azon költségeit, amelyek közvetlenül kapcsolódnak a szerkezeti méretekhez. A költségoptimalás egy nyomásnak kitett bordázott hegesztett lemezen került bemutatásra. A számítások azt mutatják, hogy a költségek nagymértékben függenek a hegesztési és vágási technológiától, még vékonyabb lemezek esetén is. Az újabb hegesztési és vágási technikák segítségével meghatározhatjuk a legjobb technológiát és a minimális költségeket. A TIG és a lézeres hegesztés viszonylag gyors, és ha nem vesszük figyelembe a beruházási költségeket, akkor lehetnek gazdaságosak. A lézér, a plazma és a vízsugaras vágás is nagymértékben függ a vastagságtól, de optimalással megtalálható a gazdaságos megoldás. A konkrét példánál a teljes költségcsökkenés 24% lehet lézeres hegesztés esetén a SMAW helyett, és 12% lehet a lézeres vágással, a normál sebességű acetilén vágás helyett.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

7. IRODALOM

- [1] Klansek, U. & Kravanja, S.: Cost Estimation, Optimization 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] Jalkanen, J.: Tubular Truss Optimization Using Heuristic Algorithms, PhD. Thesis, Tampere University of Technology, Finland. 104 p. (2007).
- [3] Tímár, I., Horváth, P. & Borbély, T.: Optimierung von profilierten Sandwichbalken, Stahlbau, 72 (2): 109-113, (2003).
- [4] Farkas, J. & Jármái, K.: Analysis and Optimum Design of Metal Structures. Balkema Publishers, Rotterdam, Brookfield, (1997).
- [5] Farkas, J. & Jármái, K. (2003) Economic design of metal structures, Millpress Science Publisher, Rotterdam, 340 p. ISBN 90 77017 99 2
- [6] Farkas, J., Jármái, K. (2008): Design and optimization of metal structures, Horwood Publishers, Chichester, UK, 2008: 328. ISBN: 978-1-904275-29-9
- [7] Mela, K., Heinisuo, M.: Weight and Cost Optimization of Welded High Strength Steel Beams, Engineering Structures, 79 (15), 354-364, (2014).

- [8] Cost Studio: http://www.acoste.org.uk/uploads/EMC_seminars/COST-STUDIO-example.pdf, (last accessed on Dec.29, 2017)
- [9] 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).
- [10] Pahl, G. & Beelich, K.H.: Kostenwachstumsgesetze nach Ähnlichkeits-beziehungen für Schweiss-verbindingen. VDI-Bericht, Nr. 457, 129-141, Düsseldorf, (1992).
- [11] Jármái, K. & Farkas, J.: Cost Calculation and Optimization of Welded Steel Structures, Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, 50 (2), 115-135, (1999).
- [12] Bodt, H.J.M.: The Global Approach to Welding Costs. The Netherlands Institute of Welding, The Hague, (1990).
- [13] COSTCOMP: Programm zur Berechnung der Schweisskosten. Deutscher Verlag für Schweissttechnik, Düsseldorf, (2002).
- [14] 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).
- [15] TIG welding calculator, <https://www.millerwelds.com/resources/weld-setting-calculators/tig-welding-calculator> (last accessed on Dec.27, 2017).
- [16] Estimating and comparing weld metal costs, http://www.esabna.com/euweb/awtc/lesson9_1.htm (last accessed on Dec.27, 2017).
- [17] Laser welding: <http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Great%20Designs%20in%20Steel/GDIS%202013/Laser%20Welding%20101%20%20Case%20Studies%20%20Part%20I.pdf>
- [18] Dawes, Ch.: Laser Welding: A Practical Guide, Woodhead Publishing, 258 p. 1992.
- [19] Laser Comparison – Cutting Speed and Rate of Feed, <http://jmtusa.com/laser-comparison-cutting-speed-and-rate-of-feed/> (last accessed on Dec.27, 2017).
- [20] Lincoln Electric Cutting speeds, <https://torchmate.com/metric-measures/Recommended-Cut-Speeds> (last accessed on Dec.27, 2017).
- [21] KMT Waterjet Calculator for 90,000 PSI - 50,000 PSI Cutting Speeds, <https://www.kmtwaterjet.com/kmt-cut-calculator.aspx> (last accessed on Dec.27, 2017).

KOMPOZIT ANYAGBÓL KÉSZÜLT OLAJTEKNŐ FRÖCCSÖNTÉS SZIMULÁCIÓJA

INJECTION MOLDING SIMULATION OF A COMPOSITE OIL PAN

Spisák Bernadett, Beleznai Róbert***

ABSTRACT

Current environmental pollution issues remain to be topical, that is why more regulations are introduced to reduce the adverse effects on the environment. As a consequence new rules in the automotive manufacturing were adopted by the European Union.

Therefore many car manufacturers are involved in the examinations aimed at the accomplishment of the significant weight reductions in vehicles. One of the solutions lies in the replacement of the material of the components. The paper presents the process of substitution of the metal oil pan into the composite one.

For polymer-based composites, the most common production method is the injection molding. This method was chosen for the manufacturing process of the oil sump and injection molding simulation was executed. The results obtained from the researches are presented.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban egyre nagyobb problémát jelent a környezetszennyezés, ezért egyre több szabályozást hoznak létre a környezetre gyakorolt káros hatások csökkentése érdekében. Az Európai Unióban kibocsátásra kerülő szén-dioxid 12%-áért a járművek felelősek, ezért az újonnan gyártott autókra vonatkozóan a szennyező anyag kibocsátásának nagyságára új jogszabályt vezettek be: 2021-re az átlagos szén-dioxid kibocsátást kilométerenként 95 grammra kell lecsökkenteniük a gyártóknak. A 2021-re kitűzött célok 40%-os csökkenést jelentenek a 2007-es 158,7 g/km értékhez képest. Ha a gyártó flottájának átlagos szén-dioxid kibocsátása 2012-től bármely évben meghaladja a határértéket, akkor a gyártónak minden egyes regisztrált gépkocsi esetében többlet kibocsátási díjat kell fizetnie [1]. Ezek a tények jól szemléltetik, hogy az autógyártóknak új módszerekkel csökkenteniük kell a járművek szén-dioxid kibocsátását. Egyik megoldás erre az alkatrészek anyagának megváltoztatása, amellyel súlycsökkentés érhető el. Munkánk során irodalomkutatás segítségével feltérképeztük a

járművekben található alkatrészeket és ezek anyagait. A cél egy olyan alkatrész felderítése volt, amelynek anyagát ki lehet váltani egy kisebb sűrűségű polimer kompozitral, ezért elsősorban a fém alapú komponenseket vizsgáltuk meg részletesebben. Az egyik ilyen komponens az olajteknő, amelyet leggyakrabban alumínium ötvözetből gyártanak. Súlycsökkentő megoldás lehet az alumínium hab alkalmazása is. Ezzel kapcsolatban már különböző kutatásokat végeztek, amelyek leginkább az akusztikai vizsgálatokra fókuszálnak [2]. Másik lehetőség a polimer alapú kompozit anyag használata, melyhez kapcsolódó elemzésről adunk most összefoglalást.

2. POLIMER ALAPÚ KOMPOZIT ANYAGOK AZ AUTÓIPARBAN

A kompozit anyagok számos előnnyel rendelkeznek a hagyományos anyagokkal szemben, ilyen például a kiváló korróziós ellenállás, nagy szilárdság, dinamikus hatásokkal szembeni jobb ellenálló képesség, kisebb súly. Ezek a tulajdonságok növelik az autók teljesítményét, nagyobb biztonsághoz és kisebb energiaigényhez vezetnek. Egy autó teljesítménye a motor teljesítménye mellett attól is függ, hogy ez milyen arányban van a jármű súlyával. Ezáltal a könnyebb autók alacsonyabb üzemanyag fogyasztással rendelkeznek [3].

Az előrehaladó technológiai színvonal miatt szükség van különböző, speciális tulajdonságokkal rendelkező termékekre, azonban a hagyományos anyagok ezeket az elvárásokat nem tudják teljesíteni, viszont kompozit anyag használatával ezeket az igényeket meg lehet valósítani. Szálas vagy részecske formában rendelkezésre álló anyagok mátrixba történő beágyazásával olyan tulajdonságok érhetőek el, amelyek egyik kiinduló anyag esetén sincsenek jelen. Az erősítő szálak rögzítése és szétválasztása a mátrix anyag legfontosabb feladata, mellyel elkerülhető a kompozit deformálódása közbeni kölcsönös súrlódás. Polimer kompozitok erősítésére leggyakrabban erősítőszálakat alkalmaznak. A polimerekben a szál típusú

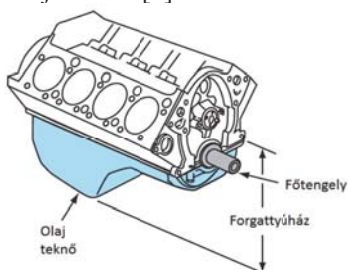
* PhD hallgató, Miskolci Egyetem Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék

** Vezető kutató, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

erősítőanyagokat a mechanikai tulajdonságok, különösen a keménység, a húzószilárdság, a húzó rugalmassági modulus, a kúszás és az ütésállóság javítására használják [4]. A kompozitokat a bennük lévő erősítő anyag alapján csoportokra lehet osztani. A kompozitok különböző csoportjai (rövid, hosszú és folyamatos szállal erősített kompozitok) közül a leggyakrabban alkalmazott típus a rövid szálerősítésű hőre lágyuló polimer, melynél a kompozit tulajdonságainak változtatását az erősítő szálak koncentrációjával szabályozzák [5].

3. AZ OLAJTEKNŐ KIVÁLTÁSA

Az olajteknőt általában acéllemezéből vagy alumínium öntvényből készítik, feladata a forgattyúház elszigetelése a környezettől, emellett olajtárolóként működik. A motor működése közben az olajszivattyú kiszívja az olajteknőből az olajat, és a motoron keresztül keringtetik; miután az olaj áthaladt a motoron, visszatér az olajteknőbe [6].



1. ábra Olajteknő elhelyezkedése [6]

Kétféle olajteknőt különböztetünk meg: szerkezeti és nem szerkezeti olajteknő. Az első jellemzően alumínium öntvényből készül, merevséget biztosít a motorbloknak; a másik fajta anyaga általában egyszerű bélyegzett acél. A világon található motorok több mint 70%-ánál az első típust alkalmazzák. Az olajteknőkről szóló irodalomkutatás során kiderül, hogy vannak olyan autógyártó cégek, ahol már kompozit anyagból készítik el ezt az alkatrészt. Ide sorolható például a Volkswagen Golf, Audi A3 és S3, Jaguar, Land Rover és a Peugeot 508. Az ezeknél megfigyelt kialakításokat az olajteknő tervezése során figyelembe vettük, azonban ezekről csak képi információ állt rendelkezésre, pontos útmutatás a tervezést illetően nem.

A hagyományos polimerek nem alkalmazhatóak az olajteknő elkészítésére, mivel a fellépő terheléseknek nem tudnak ellenállni, ezért szükséges a polimer alapú kompozit alkalmazása.

Léteznek olyan kompozit anyagok, amelyek megfelelőek ezen alkatrész előállítására. Ilyen a DuPont által kifejlesztett Zytel anyag, amely 35%-ban tartalmaz üvegszál erősítést, illetve a mátrixa hidrolízis álló poliamid 66-ból áll. Ez a kompozit ellenálló a forró olajjal és zsirokkal szemben, hő stabilizált és

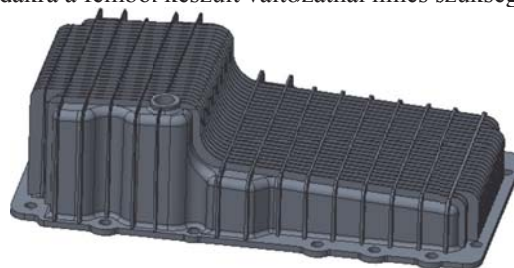
fröccsenhető. Az 1. táblázat a kompozit tulajdonságait foglalja össze.

1. táblázat: Kiválasztott anyag tulajdonságai [7]

Tulajdonságok	Zytel®
	70G35HSLRA4 BK267
Szakítószilárdság	210 MPa
Szakadási nyúlás	3 %
Sűrűség	1,41 g/cm ³
PA sűrűsége	1,14 g/cm ³
PA Poisson tényezője	0,3
PA Young modulus	2
Üvegszál sűrűsége	2,55g/cm ³
Üvegszál Poisson tényezője	0,2
Üvegszál Young modulus	70 GPa

3.1. Fém alkatrész alapján áttervezett geometria

Az alkatrész CAD modelljét Creo Parametric 2.0 tervezőprogramban készítettük el. A felületen „feláldozható” (felverődő kövek esetén védelmet biztosító) bordákat helyeztünk el, amelyek sérülése esetén sem veszíti el az olajteknő a funkcióját. Ilyen bordákra a fémből készült változatnál nincs szükség.



2. ábra Bordázott geometria

4. A FRÖCCSÖNTÉS SZIMULÁCIÓ

Az olajteknő hálózását a Moldex3D Desingerben készítettük el. A beömlő nyílás más néven gát elhelyezését nagymértékben befolyásolja a falvastagság változása. A gátnak a vastagabb felületen kell lennie, annak érdekében, hogy a kitöltés egyenletesen menjen végbe. Annak érdekében, hogy megállapítsuk, hogy megfelelő mennyiségű gátat használtunk, ellenőrizni kell a hossz/vastagság arányát. Ha ez az érték 200 felett van, akkor a terméket nehéz fröccsönteni, ezáltal több gát alkalmazása az ajánlott. A vizsgált olajteknő esetében a maximális L/t arány 151, amely az ajánlott maximális érték alatt van, ezáltal a forma egy beömlőnyílás használatával fröccsenhető. A termék fröccsöntésének elemzéséhez szükséges a hűtőcsatorna modellezése is. Az alkatrésznél különböző kialakítású hűtőcsatornák végeredményre gyakorolt hatását vizsgáltuk, így számos elrendezést készítettünk el, amelyek eredményeiből két esetet mutatunk be. A háló metszeti képét a 3. ábra szemlélteti.



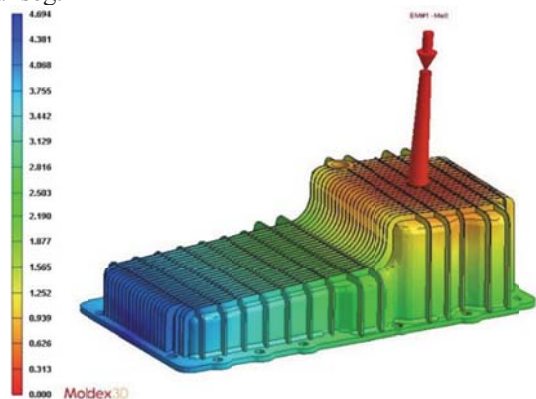
3. ábra Hálózott geometria

Anyagnak a már korábbiakban bemutatott PA 66 Zytel kompozitot választottuk. Ennek az anyagnak a viszkozitása alacsony, ezért fröccsöntő gépet választottuk, amely 500-600 cm³/s áramlási sebességgel rendelkezik. Az ömledék hőmérsékletének 285 és 305 °C közötti értéket kell beállítani a kompozit tulajdonságaiból adódóan.

Minden esetben egy teljes fröccsöntési szimulációt végeztünk el, amely tartalmazza a kitöltés, a tömörítés és a lehűtés folyamatát, ezek mellett a gyártás során keletkező vetemedést is megvizsgáltuk.

5. EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

Először a kitöltésből kapott eredményeket elemeztük. A 4. ábra a geometria kitöltési idejét szemlélteti. A bordázott olajteknő kitöltéséhez 4,7 másodpercre volt szükség.



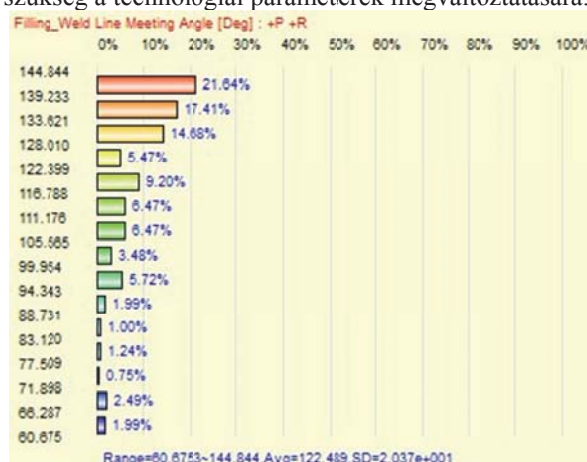
4. ábra Kitöltés ideje

Fröccsöntés során keletkezhetnek összecsapási vonalak, amelyek hatására az anyag mechanikai tulajdonságai nagymértékben lecsökkenhetnek. A fröccsöntési vonalak akkor keletkeznek, amikor kettő vagy több ömledék front találkozik a kitöltési szakaszban. Ha az eltérő olvadási frontok találkozás előtt lehűlnek, akkor nem fognak tudni jól egymáshoz csatlakozni, így okozva gyengeséget az alkatrészben.

A hegedési vonalakat két csoportra oszthatjuk. Az angol nyelvű szakirodalom különböző megnevezéseket használ a két fajta hegedési vonal leírására. Az angol

„meld” szó olvadásra, illetve egyesülésre, a „weld” szó pedig összehegedésre és összeforrásra utal. A két hegedési vonal közti különbség leírható a felületen létrejövő θ szöggel. Amennyiben a találkozó frontvonalak hegedési szöge nagyobb, mint 135°, akkor Weld line-ról, ha a θ szög kisebb, mint 135° akkor pedig Meld line-ról beszélünk. A minimális hegedési szög értéke 45°, ennél kisebb szög esetén már szükség van a paraméterek megváltoztatására. Megoldás lehet a gátak helyének újra pozicionálása, a fröccsöntendő elem vastagságának a megváltoztatása, a kitöltő rendszer tervének az optimalizálása, valamint az olvadék és a szerszám hőmérsékletének a növelése.

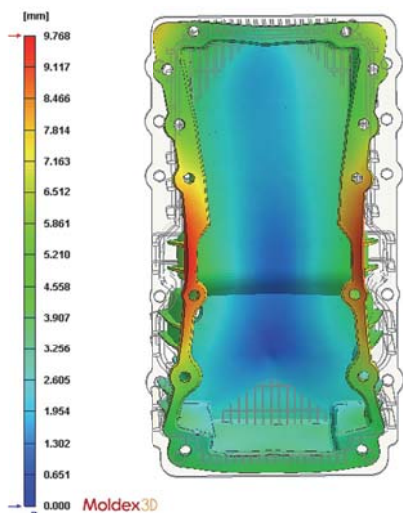
A bordázott geometriánál keletkező összecsapási vonalak hegedési szög szerinti eloszlását a 6. ábra mutatja be. A keletkező minimális érték 60,675°. Mivel a minimális szög értéke nagyobb, mint 45°, így nincs szükség a technológiai paraméterek megváltoztatására.



6. ábra Összecsapási vonalak hegedési szögeinek eloszlása

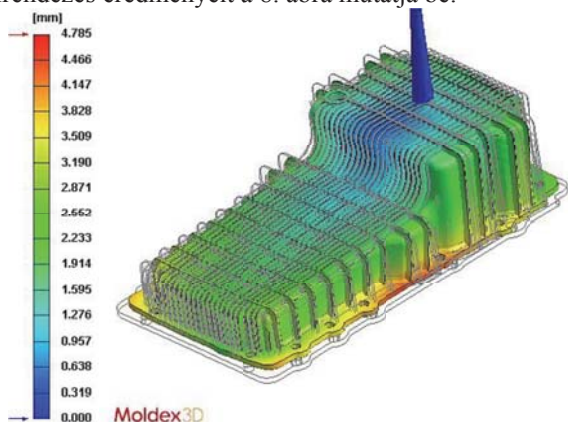
A fröccsöntés szimuláció elvégzésével meghatározható a vetemedés mértéke. A vetemedést a geometria, a forma, a folyamat, és az anyag változtatásával befolyásolhatjuk. A geometria esetében ez lehet a fröccsöntendő darab vastagságának vagy az áramlás irányának a változtatása, a szerszám esetén a gát és a hűtőcsatornák újratervezése, a technológiai folyamatnál pedig az ömledék hőmérséklet, a forma hőmérséklet vagy az utónyomási idő variálása [8]. Elsősorban azt vizsgáltuk, hogy a hűtőcsatornák eltérő kialakításai hogyan befolyásolják a vetemedést. Ehhez számos hűtőcsatorna rendszert készítettünk el, emellett az egyes csatornák hőmérsékletét is változtattuk ezzel próbálva befolyásolni a kapott eredményeket.

Az első esetben egy egyszerű kialakítást hoztunk létre, ahol a hűtőcsatornák az olajteknő felső és alsó oldalán, vele párhuzamosan helyezkedtek el. Ebben az esetben minden hűtőcsatornát megegyező hőmérséklettel láttunk el. Az így kapott eredményt a 7. ábra szemlélteti, mely alapján a vetemedés mértéke majdnem elérte a 10 mm-t.



7. ábra Kialakult vetemedés nagysága az első hűtőcsatorna kialakítás esetében

Az egyes kialakítások szimulációs eredményeinek megvizsgálása után a legjobb eredményt abban az esetben kaptuk, ahol „baffle” típusú hűtőcsatornát alkalmaztunk, amely a fő hűtőcsatornához merőlegesen kapcsolódik, és tartalmaz egy terelőlemezt, amely a hűtési utat két félkör alakú csatornára osztja fel. Az olajteknő belső falainál található hűtőcsatornák hőmérsékletét az átlagos 100°C fölé állítottuk be, míg a külső falak esetében ezt az értéket lecsökkentettük. Ebben az esetben a vetemedés 5 mm alatti, amely az előző értékekhez képest nagy előrehaladás. Ezen elrendezés eredményeit a 8. ábra mutatja be.



8. ábra Kialakult vetemedés nagysága a módosított hűtőcsatorna kialakítás esetében

A helyes működéshez a kapott deformációs eredmények még nem megfelelőek, mivel a tömítési felületek térése minimális, és a vetemedés ezen a részen a legnagyobb, ezért a fröccsöntés szimuláció további változtatásokat igényel. Azonban az eredményekből jól látható, hogy a használt séma segítségével ez a hiba lecsökkenthető, és a helyes hűtőcsatorna rendszer kialakítása elengedhetetlen egy fröccsöntött darab megfelelő minőségű előállításához. A korábban

felsoroltak alapján a maradék vetemedés megszüntetésére egy további lehetséges megoldás a több beömlő csatorna elhelyezése a terméken, mivel így megváltozik a szálak orientációja.

Fontos megvizsgálni azt, hogy az olajteknő geometriájának és anyagának megváltoztatásával milyen mértékű súlycsökkentés érhető el. A fémből készült olajteknő térfogata 1897,05 cm³, a bordával ellátotté pedig 2456,81 cm³. A megnövekedett térfogat nem jelenti azt, hogy ezzel a módszerrel nem érhető el súlycsökkentés, mivel a két anyag sűrűsége jelentősen eltér. Az alumínium sűrűsége 2,7 g/cm³, míg a DuPont által előállított kompozit sűrűsége 1,41 g/cm³. Ezeket az értékeket figyelembe véve az olajteknő súlyát körülbelül 33%-kal lehet redukálni, amely jelentős súlycsökkentést jelent ezen alkatrész esetében. További optimalizálással ez az érték növelhető.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a GINOP-2.2.1.-15-2016-00015 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósult meg.

7. IRODALOM

- [1] Reducing CO2 emissions from passengers cars: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en (2017.07.05)
- [2] Jalic K., Priebsch H-H., Brandl F., Andres O., Fingerhut H-P.: Engine noise reduction potential applying high damping materials for component design, Aachen Acoustic Colloquium, Aachen, (2009)
- [3] Elmarakbi A., Advanced composite materials for automotive applications: Structural Integrity and Crashworthiness ISBN: 978-1-118-42386-8 (2014)
- [4] Varga Cs., Műanyag kompozitok, Pannon Egyetem (2012)
- [5] Chou, T.-W., R. L. McCullough and R. B. Pipes. Composites, Scientific American, 254(10):193-203 (1986)
- [6] AUTOMOTIVE, C. D. X. Fundamentals of Automotive Technology. Jones & Bartlett Publishers, ISBN13: 9781284109955 (2017)
- [7] Dupont által gyártott Zytel® 70G35HSLRA4 BK267 kompozit tulajdonságai: <http://www.campusplastics.com/campus/de/datasheet/Zytel%C2%AE+70G35HSLRA4+BK267/DuPont+Engineering+Polymers/52/809327f4> (2018)
- [8] Chen, E.: How Injection Molding Simulation Helps Reduce Warp Issues (webinar) CoreTech System Co., Ltd

CSŐKÖTEGES HŐCSERÉLŐ CSŐ OLDALI HŐÁTADÁSÁNAK ANALITIKUS ÉS NUMERIKUS SZÁMÍTÁSNAK ÖSSZEHASONLÍTÁSA MÉRÉSI EREDMÉNYEKKEL

COMPARISON OF ANALYTICAL CALCULATION, NUMERICAL SIMULATION AND MEASUREMENTS OF TUBE SIDE HEAT TRANSFER OF A SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGER

Petrik Máté^{*}, Szepesi Gábor^{**}, Jármai Károly^{***}

ABSTRACT

In the present paper, a model shell-and-tube heat exchanger with horizontal baffles was numerically investigated compared to the measured values using the commercial software SC-Tetra V11. Determination of the heat transfer coefficients for the tube side and the shell side depends on the type of the flow. In case of laminar flow this heat transfer coefficient has lower value, than a turbulent flow, and the calculation method is different. Baffles used in the shell side to improve the heat transfer and cause turbulent flow, while in the tube side will be laminar in this study.

1. BEVEZETÉS

A csőköteges hőcserélők a vegyipar, a petrokémia és az energiaipar „igáslovai”: viszonylag kis térfogatban rendkívül nagy hőátadó felülettel rendelkeznek, kialakításuknak köszönhetően rendkívül széles nyomástartományban alkalmazhatóak, nyomásesésük viszonylag kicsi, és egyszerű módosításokkal növelhető a teljesítményük. Megfelelő anyagkiválasztással szinte bármilyen fluidumok között képes a hőátadásra.

A hőtani számításukra rengeteg módszer rendelkezésre áll a szakirodalomban. Két alapvető módszer a klasszikus teljesítmény számítás ($Q = F \cdot k \cdot A \cdot \Delta T_{LOG}$), a másik pedig a hatékonyságon alapuló ϵ -NTU módszer. Alapvetően ezek a módszerek elméletileg bizonyítottak, azonban a hőátadási viszonyok számszerűsítése tapasztalati összefüggésekkel történik. Ezek a hőátadási tényezők az áramlás típusától, a geometriai viszonyoktól és az áramló fluidumok anyagtulajdonságaitól jelentősen

függenek. Napjainkban a CFD-szoftverek és a nagyteljesítményű számítógépek segítségével ezeket a hőátadási viszonyokat már nem csak kísérleti úton, hanem szimulációval is vizsgálhatók.

Különböző kutatók különböző alkalmazási területen vizsgálják ezeket a hőátadási viszonyokat. Yu-ting et al. [1] a lamináris-turbulens tartomány határán történő viszonyokat tanulmányozta olvadt sók esetén. Yang társaival [2] nem kör keresztmetszetű csövekben történő hőátadást vizsgált. A cső geometriája által még kisebb Re-szám esetén is egy viszonylag nagyobb hőátadási tényező tapasztalható. Rao [3] szintén a cső alakjának mind csőoldalon, mind köpenyoldalon, míg Wang [4] a köröcsőre hegesztett félkör keresztmetszetű spirál hatását vizsgálta. Mindkét tanulmány igazolta, hogy mindenfajta ilyen behatás, ami az áramlást megzavarja, egy jobb hőátadási tényezőt fog eredményezni, ami által a hőcserélő teljesítménye is növekedni fog. Sajnos minden hőátadásnövelő alkatrész beépítése együtt fog járni egy nyomásesés növekedéssel, ami az üzemelési és gyártási költségeket növelni fogja.

2. KÍSÉRLETI BERENDEZÉS

2.1. A hőcserélő tápegység

A vizsgált kísérleti berendezések mindegyike a német GUNT cég által gyártott hőcserélő egységek. A mérőberendezés a GUNT WL 110-es tápegység volt, melyet kifejezetten hőcserélők kényszerkonvekciós hőátadásának vizsgálatára fejlesztették ki. Sematikus ábrája az 1. ábrán látható.

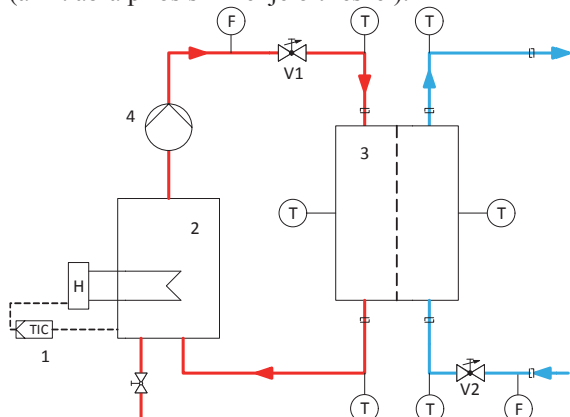
A hőcserélő egység rendelkezik egy 10 literes tartállyal, melyben a meleg közeget lehet előállítani. Ezt egy 3kW teljesítményű fűtőszál biztosítja. A meleg

^{*} PhD hallgató, Miskolci Egyetem Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék

^{**} egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék

^{***} egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék

közeg hőmérsékletét 1 °C-onként lehet állítani, a maximum hőmérséklet pedig 70°C. Ennek a vízkörnek az áramlását egy 120W teljesítményű szivattyú idézi elő, melynek szállítókapacitása maximum 10 l/min lehet (az 1. ábra piros színnel jelölt részei).



1. ábra: A WL 110 tápegység sematikus ábrája

1. táblázat: Jelmagyarázat

1	Hőmérséklet-szabályozó
2	Fűtött tartály
3	Hőcserélő
4	meleg vízkör szivattyú

A hideg vízkör közvetlenül kapcsolódik a vízrendszerre, így ennek a hőmérsékletét nem, csak a térfogatáramát lehet szabályozni a V2-vel jelölt szelep segítségével (az 1. ábra kék színnel jelölt részei). A két közeg kilépő és belépő hőmérsékletét valamint a térfogatáramokat a tápegység kijelzi, valamint ezeket az értékeket a számítógépes szoftverével el is lehet menteni, akár másodperces gyakorisággal is.



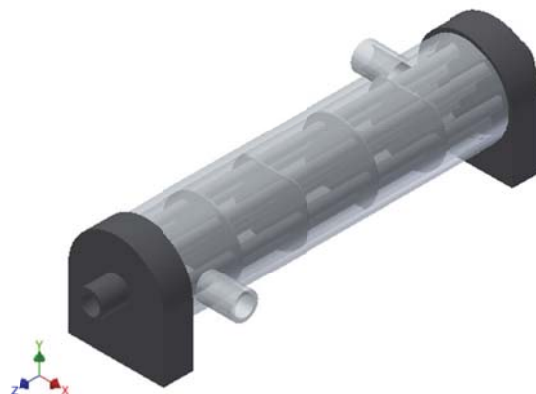
2. ábra: A vizsgált modell hőcserélő

2.2. A vizsgált hőcserélő

A vizsgált kísérleti hőcserélő szintén GUNT gyártmányú volt, mely a WL 110.03 azonosító jelet viseli. Ez egy csőköteges hőcserélő, melyben 7 db, Ø6mm külső átmérőjű és 1mm falvastagságú cső található, a köpeny Ø50mm külső átmérőjű 3mm-es falvastagsággal. A köpenytérben található 4 db vertikális terelőlemez, egymáshoz képest 180°-kal elforgatva.

Ezek a terelőlemezek egymástól 37,3mm-re vannak és ~10%-os nyitottságúak. A vizsgált hőcserélőt a

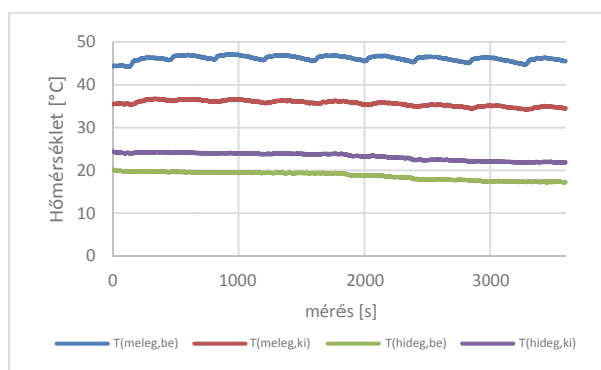
2. ábra, míg a szimulációhoz alkalmazott modellt a 3. ábra mutatja.



3. ábra: 3D-s modell a szimulációhoz

2.3. A mérések eredményei

A kísérlet során a cső oldali hőátadás vizsgálata volt a cél, ezért a négy elvégzett mérés során a köpeny oldali közeg belépő hőmérséklete (~45°C) és a térfogatárama (0,45 l/min) változatlan volt. A mérés során a köpenyoldali közeg a meleg víz volt. A vízrendszer miatt a hideg közeg (csőoldal) belépő hőmérséklete is állandó volt (~20°C), így a változó paraméter a csőoldal térfogatáram. A mérések időtartama 1 óra, 1s-os mintavételi frekvenciával. Indokolt volt az egy órás mérési idő, mivel a tartály hőmérséklete miatt erőteljesen hullámzottak a hőmérsékletek, ahogy ezt a 4. ábra is mutatja.



4. ábra: Mérési eredmények

3. CFD szimuláció

3.1. Geometriai modell

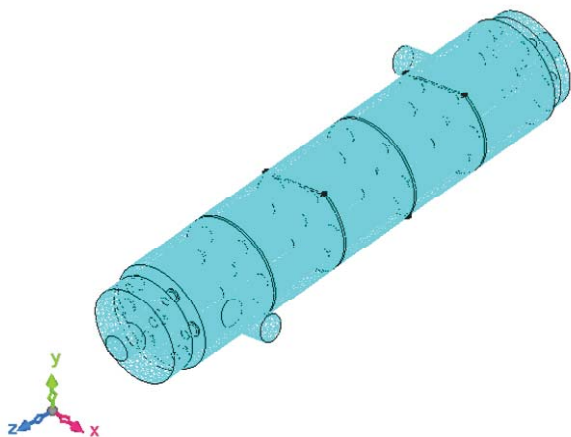
A CFD szimuláció a Tetra/SC kereskedelmi forgalomban kapható szoftverrel készült. A modellben 3 térrész található: a csőtéri és a köpenytéri víz közeg, valamint a csövek, ami szénacél anyagminőségű. A 3

térrész után 7 különböző felület lett meghatározva: a csőtér és köpenytér kilépő és belépő felülete, a köpenytér külső fala, a cső és csőtér közötti fal, valamint a cső és köpenytér közötti fal.

3.2. Peremfeltételek

A vizsgálat célja az áramlás és a hőmérséklet eloszlás kiértékelése volt. A szimuláció során az alkalmazott turbulenciamodell a standard k-ε volt. A fluidumok összenyomhatatlan víz anyagminőségűek, melyeknél a gravitáció hatása elhanyagolásra került. A belépő felületekre térfogatáram és hőmérséklet, a kilépő felületekre statikus nyomás peremfeltétel lett előírva, mely alapját az elvégzett mérések képezték. A térrészek közötti falakra (köpenytér és cső, valamint cső és csőtér) termikus ellenállás nélküli álló fal, míg a köpeny külső falára adiabatikus fal peremfeltétel került alkalmazása. A nyomás-korrekciós modell a SIMPLEC módszer volt, A a kilépő felületek hőmérsékletét a felület nagyságának átlagának a függvényében történt rögzítésre az eredményfájlokban.

A csőtérre és a csövekre kisebb méretű (0,1mm), míg a köpenytérre nagyobb méretű (0,2mm) háló volt szükséges. A szilárd-folyadék fázis érintkezésénél három rétegű, prizmatikus strukturált felületi réteg alkalmazása volt szükséges a falak menti áramlás és a hőmérséklet pontosabb számítása miatt. Az alkalmazott háló elemszáma 4.057.027, ezt a hálót az 5. ábra mutatja.



5. ábra: Generált háló

3.3. Eredmények

A szimuláció elvégzése után a kapott kilépő hőmérsékletekből, a hőátadó felületekből és a hőteljesítményből a hőátadási tényező értékeket vissza lehet számítani, így hasonlítva össze a szimuláció eredményét a valóságban kapott értékekhez.

$$k = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{LOG}} \quad (1)$$

Az (1) egyenletben szereplő Q hőteljesítmény pedig a meleg közeg hűléséből vagy a hideg közeg melegedéséből számítható:

$$Q = c_h \cdot m_h \cdot \Delta T_h = c_m \cdot m_m \cdot \Delta T_m \quad (2)$$

Mind a 4 mérésből 4-4 szimuláció készült, így az egy térfogatáramhoz tartozó eredmények számtani közepét mutatja a 2. táblázat:

2. táblázat: Mért és szimulált hőátadási tényezők

<i>Csőoldali térfogatáram</i>	<i>mért tényező</i>	<i>szimulált tényező</i>	<i>eltérés</i>
1,00	761,14	697,44	8,37%
1,50	801,92	772,48	3,60%
2,00	822,20	815,03	0,87%
2,50	891,3	867,42	2,68%

4. ANALITIKAI SZÁMÍTÁSOK

4.1. Alapösszefüggések

A szakirodalom a Re-szám függvényében három különböző áramlási tartományt különböztet meg: a lamináris ($Re < 2300$), az átmeneti ($2300 < Re < 10000$) és turbulens ($Re > 10000$) áramlást. Minél turbulensebb az áramlás, azaz minél örvényesebb, annál nagyobb lesz a hőátadási együttható értéke. Teljesen kialakult lamináris (3) és turbulens áramlásnál (4) a következő összefüggéseket alkalmazhatjuk:

$$Nu_{lam, teljes} = 3,66 \quad (3)$$

$$Nu_{turb, teljes} = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3} \quad (4)$$

A 3. egyenlet alkalmazásához azonban szükség van a kialakulási hossz ismeretére. Ez a hidraulikai belépési tartomány azt mutatja meg, hogy milyen hosszúságú csövezetékre van szükség ahhoz, hogy teljesen kialakuljon a lamináris tartomány. Ezt a jellemzőt a Re-számból és a csőátmérőből számítható:

$$L_h = 0,05 \cdot Re \cdot D \quad (5)$$

Jelen esetben mind a 4 térfogatáram esetén ez a kialakulási hossz hosszabb volt, mint a hőcserélő hossza, ezért olyan összefüggéseket szükséges alkalmazni, amelyek a kialakulási tartományon belül mutatják meg a hőátadási tényezőt. Sieder-Tate [5] a következő összefüggést javasolja:

$$Nu = 1,86 \cdot \left[Re \cdot Pr \cdot \left(\frac{d}{L} \right) \right]^{1/3} \quad (6)$$

Ennek mintájára a VDI szervezet [6] a következőre módosította az eredeti összefüggést:

$$Nu = 1,615 \cdot \left[Re \cdot Pr \cdot \left(\frac{d}{L} \right) \right]^{1/3} \quad (7)$$

Időben nem sokkal Sieder-Tate után Hausen [7] az alábbi összefüggést publikálta: a lamináris áramlásra vonatkozó Nu-számot korrigálta egy tényezővel, ami a kezdeti turbulenciát veszi figyelembe:

$$Nu = 3,66 + \frac{0,0668 \cdot \frac{d}{L} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 0,04 \cdot \left(\frac{d}{L} \cdot Re \cdot Pr \right)^{2/3}} \quad (8)$$

Végül Yu-ting [1] viszonylag újabb összefüggése lett jelen kutatásban felhasználva:

$$Nu = 0,012 \cdot \left(Re^{0,87} - 280 \right) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left[1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{2/3} \right] \quad (9)$$

4.2. Számított eredmények

Alkalmazva mind a 16 mérési eredményre a négy összefüggést azt az eredmény adódott, hogy ebben az esetben Yu-ting összefüggése (9. egyenlet) nem alkalmazható, mert 22-77% közötti eltérés tapasztalható az eredmények között. Az eredeti és módosított Sieder-Tate összefüggések közül a módosított adott jobb eredményeket, de az eltérés még így is 5-10% között ingadozott. Legkisebb négyzetek módszerét alkalmazva az összefüggésben szereplő konstans változtatva az alábbi összefüggés már 4%-on belüli eltérést mutatott a mért adatokhoz képest:

$$Nu = 1,4939 \cdot \left[Re \cdot Pr \cdot \left(\frac{d}{L} \right) \right]^{1/3} \quad (10)$$

Hasonlóan viselkedett Hausen összefüggése. Az eredeti összefüggés 8-12%-os eltérést mutatott, de a hasonlóan módosított összefüggés már bőven 5%-nál kisebb különbséget adott eredményül:

$$Nu = 3,66 + \frac{0,1688 \cdot \frac{d}{L} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 0,181 \cdot \left(\frac{d}{L} \cdot Re \cdot Pr \right)^{2/3}} \quad (11)$$

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott eredményekből látható, hogy még egy ilyen kisméretű hőcserélő hőátadási folyamatának vizsgálata összetett és időigényes munka. A hőcserélő tápegység melegvíz tartályának hőmérséklet-szabályozása miatt a mért eredmények az időben folyamatosan változnak, ezért a stacionárius állapot nem

tud kialakulni. Ezek a változások okozta hatások a szimulációban is megjelennek, ezért vannak eltérések még a hasonló peremfeltételű szimulált eredményekben is. A szakirodalomban található összefüggések alapvetően pontos eredményt adnak, viszont a vizsgált geometriához a módosított összefüggések (10-11) adják meg a valóban kialakuló hőátadási tényező értékét.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

7. IRODALOM

- [1] W. Yu-ting, L. Bin, M. Chong-fang, and G. Hang, “Convective heat transfer in the laminar-turbulent transition region with molten salt in a circular tube,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 33, No. 7, pp. 1128–1132, 2009.
- [2] J. Yang, L. Ma, J. Liu, and W. Liu, “Thermal-hydraulic performance of a novel shell-and-tube oil cooler with multi-fields synergy analysis,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 77, pp. 928–939, 2014.
- [3] J. B. B. Rao and V. R. Raju, “Numerical and heat transfer analysis of shell and tube heat exchanger with circular and elliptical tubes,” *Int. J. Mech. Mater. Eng.*, Vol. 11, No. 1, 2016.
- [4] W. Wang, Y. Zhang, B. Li, and Y. Li, “Numerical investigation of tube-side fully developed turbulent flow and heat transfer in outward corrugated tubes,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 116, pp. 115–126, 2018.
- [5] E. N. Sieder and G. E. Tate, “Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes,” *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 28, No. 12, pp. 1429–1436, 1936.
- [6] VDI-Gesellschaft Ver, *VDI Heat Atlas*, Second Ed. 40468 Düsseldorf: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [7] H. Hausen, “Neue Gleichungen für die Wärmeübertragung bei freier oder erzwungener Stromung (new equations for heat transfer in free or forced flow),” *Allg. Wärmeechn.*, Vol. 9, No. 4/5, pp. 75–79, 1959.

FARKAS JÓZSEF PROFESSZOR SZAKMAI ÉLETE A SZERKEZET OPTIMÁLÁS TERÜLETÉN

1927. december 15. - 2016. szeptember 15

PROFESSIONAL LIFE OF JÓZSEF FARKAS DEDICATED TO STRUCTURAL OPTIMIZATION

*Dr. Jármái Károly**

ABSTRACT

This article deals with the professional activity and life of Prof. József Farkas, who started his carrier at the University of Miskolc in 1950. His main research fields were structural optimization, residual stresses and deformations of welded structures and structural stability. He has taught generations of students, could teach difficult subject. He has built a Metal structures group, which members have a wide range of activities all over Hungary and abroad. His professional achievement helped the university to be visible on the international level also. He has been retired in 1996, but never stopped working.

1. ÉLETÚT

Farkas professzor 1950-ben diplomázott a Budapesti Műszaki Egyetem építőmérnök szakán. 1950-től tanított a Miskolci Egyetemen. 1950-59 között a Mechanikai Tanszéken tanított, majd 1959-től a Szállítóberendezések, majd Anyagmozgatási és Logisztika Tanszéken. Az elmúlt több mint hat évtized alatt órákat és továbbképzést tartott a fémszerkezetekről, hegesztett szerkezetekről és nemzetközi hírnevet szerzett. Ezeknek a képzéseknek a nemzetközi újdonsága, hogy a gépek és szállítóberendezések szerkezeti alkotóelemeinek tervezésére koncentrált. Dinamikus hatásokat, merevséget és rezgéscillapítást vizsgáltak. Ezen tárgyak beépültek a Gépészmérnöki és Informatikai Kar moduláris oktatási rendszerébe. Ezeknek a kurzusoknak a legfontosabb jellemzői a matematika, a mechanika, az optimálási módszerek és a mérnöki gyakorlat összekapcsolása. Az optimális méretezés a mérnökök szélesebb gondolkodását igénylik, mert összekapcsolják a szerkezet analízist a szerkezet szintézissel. Farkas professzor munkája alapján a kar hallgatói átfogó képet kaphattak a fém- és hegesztett szerkezetek tervezéséről.

Farkas professzor volt az első egyike, aki felismerte a számítógépek alkalmazásának fontosságát a szerkezet optimalálásban. Fel kell hívni a figyelmet arra, hogy a saját fejlesztésű költségfüggvények segítségével a gazdasági szempontokat is figyelembe tudták venni az optimalálásnál.

Az elméleti számításokat a legtöbb esetben a laboratóriumokban vagy a területen elvégzett kísérleti mérések egészítik ki, illetve igazolják.

A szerkezet szintézisből adódó összetett megközelítése nagy hatással volt nemcsak a diákjaira, hanem az egyetemen dolgozó kollégáira és az iparágban dolgozó mérnökökre is.

1996-ban nyugdíjba vonult, 1998 óta pedig professzor emeritusként folytatja korábbi munkáját. Hetente előadást tartott, felajánlotta a hallgatók számára a tervezési feladatokkal kapcsolatos konzultálást és a doktoranduszoknak az útmutatást a tézisek készítéséhez.

Az oktatói tevékenységéhez kapcsolódóan 1974-ben kiadott egy egyetemi tankönyvet Fémszerkezetek címmel. A második, átdolgozott kiadás 1983-ban jelent meg. 2016-ban pedig Jármái Károlyval írt Fémszerkezetek innovatív méretezése címmel egy új tankönyvet.

Oktatási tevékenysége során részt vesz a hegesztő mérnökök képzésében, valamint azokban, amelyeket a kezdetek óta angolul kínálnak külföldi hallgatóknak. A doktori képzésben szintén aktívan résztvevett és több PhD hallgató tudományos témavezetője volt.

Tudományos tevékenysége évtizedek óta folyamatosan zajlott. Kandidátusi értekezését bordázott lemezek tervezése témában 1966-ban védte meg a Magyar Tudományos Akadémián. A műszaki tudomány doktora címet (DSc) 1978-ban nyerte el Fémszerkezetek optimális tervezése témában. Miután átdolgozta és kiegészítette, a doktori értekezését, publikálta az Ellis Horwood, Chichester kiadó és az Akadémiai Kiadó kooperációjában. Könyvének címe: Optimum design of steel structures, 1984-ben jelent meg. A könyv akadémiai díjat nyert.

Más könyvek: A fémszerkezetek elemzése és optimalizálása, valamint a fémszerkezetek gazdasági szerkezete, a Balkema publikálta, a Millpress Science pedig Rotterdamban 1997-ben és 2003-ban. Később két másik könyvet publikáltak: A fémszerkezetek tervezése és optimalizálása, a Horwood Publishers 2008-ban és az acélszerkezetek optimális kialakítása, a Springer Verlag 2013-ban. Együttesének egykori tanítványa volt Jármái Károly. A könyvek mellett mintegy 250 tanulmányt és tanulmányt publikált. Ezek fele idegen nyelven íródott, elsősorban angolul. A cikkeket öt nyelven olvasta: angol, német, orosz, szlovák, lengyel nyelveken.

* egyetemi tanár, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

Szakértelmét az ipar is hasznosítja. Fő kutatási területei a következők voltak: fémszerkezetek optimális kialakítása, hegesztési maradó alakváltozások és feszültségek, csőszerkezetek, bordázott lemezek, szendvicsszerkezetek, rezgéscillapítás és stabilitási problémák az acélszerkezeteknél.



1. ábra. Farkas József professzor

A szerkezet optimalás területén közel hét évtizedes tevékenységet folytatott. Optimális tervezési módszerei más tudományágakban is alkalmazhatók. Angol, német és szlovák nyelven is tartott előadásokat. A következő gépekre és szerkezetekre tervezési módszereket fejlesztett ki: daruk, daru futópályák, silók, bunkerek, szállítószalagok, keretek, cellalemezek, csőszerkezetek. A szerszámgépek elsősorban préskeretekkel foglalkozott.

Főbb külső tevékenységei a Gépipari Tudományos Egyesület (GTE), a Nemzetközi Hegesztési Intézet (IIW), a Nemzetközi Szerkezet és Multidiszciplináris Optimáló Szövetség (ISSMO). A Gépipari Tudományos Egyesület a Pattantyús-éremmel jutalmazta. Elnyerte az Apáczai Csere János díját és a 45 éves kassai Műszaki Egyetem Emlékérmét is. 2002-ben a Miskolci Egyetem díszdoktora lett. Az IIW éves közgyűlésein, a csőszerkezeti konferenciákon részt vettek, melyeket a IIW XV-E albizottság rendszeresen szervezett. Nemzetközi együttműködése Japántól Kanadáig terjedt. Kapcsolata volt a világ minden tájáról érkező professzorokkal, ahogy azt az elmúlt húsz évben szervezett nemzetközi konferenciák résztvevői is

tapasztalták. Fontos szerepe volt a Szállítóberendezések, majd Anyagmozgatási és Logisztika Tanszéken. A Fémszerkezetek szakcsoport vezetője volt. Több mérnöki optimáló szakember tudományos vezetője volt: Dr. habil. Timár Imre, Jármái Károly professzor, Orbán Ferenc, Rácz Sándor, Szabó László, Szabó Ferenc, Kovács György. Első kezdeményezést adott egyes professzorok kutatási munkájában, köztük az MTA tagja, Páczelt István, Dr. habil. Matolecsy Mátyás és Dr. Cselényi József. Kiváló előadó volt. Egyszerű érthető és módon mutatta be a rendkívül bonyolult konstrukciós kialakításokat, kapcsolatokat, elméleti fejtegetéseket, hogy a közönsége megértse, mi az, ami először nehéznek tűnik. Személyes hobbjaja volt, hogy klasszikus zenét hallgatott és játszott. Három könyvet publikált a barokk zenéről és a zeneszerzőkről. Négy zenei CD-t készített, melyeken szintetizátorral játszik. Minden korábbi és jelenlegi kollégája, diákja és munkatársa ezúton emlékezik Farkas professzorra és megtartja őt fejében és szívében.

2. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott életút számos személy aktív közreműködésével alakult. Itt személyek felsorolása nélkül köszönjük mindazoknak, akik segítették Farkas professzort munkájában, vagy elfogadták az ő segítségét.

3. IRODALOM

Szakkönyvek, monográfiák



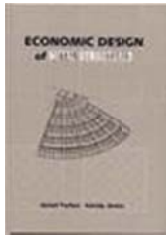
Farkas József, Jármái Károly: **Fémszerkezetek innovatív tervezése**, Gazdász-Elasztik Kiadó és Nyomda, 2015, 592 old. ISBN 978-963-358-064-6



Farkas J., Jármái K.: **Optimum design of steel structures**, Springer Verlag, Heidelberg, 2013. 288 p. ISBN 978-3-642-36867-7, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-36868-4>



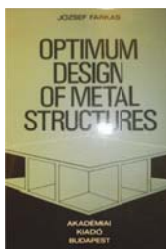
Farkas J., Jármái K.: **Design and optimization of metal structures**, Horwood Publishers, Chichester, UK, 2008. 328 p. ISBN: 978-1-904275-29-9



Farkas J. & Jármai K.: **Economic design of metal structures**, Millpress Science Publisher, Rotterdam, 2003, 340 p. ISBN 90 77017 99 2



Farkas J. & Jármai K.: **Analysis and optimum design of metal structures**, Balkema Publishers, Rotterdam, Brookfield, 1997, 347 p. ISBN 90 5410 669 7.



Farkas J.: **Optimum design of metal structures**. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1984. 222 p.



Farkas J.: **Fémszerkezetek**. 2. bővített kiadás, Budapest: Tankönyvkiadó, 1983. 476 p.



Jármai K., Farkas J. (Eds.): **International Conference on Metal Structures**, Miskolc, Hungary, April 3-5, 2003. Millpress Science Publishers, Rotterdam, 2003, 397 p. ISBN 90 77017 75 5

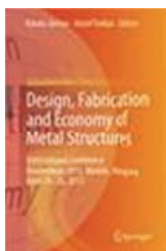


Jármai K., Farkas J. (Eds.): **Mechanics and Design of Tubular Structures**, Springer Verlag, 1998. 337 p. ISBN 3-211-83145-2



Farkas J., Jármai K. (Eds.): **7th International Symposium on Tubular Structures**, Aug. 28-30. 1996. University of Miskolc, Hungary, Proceedings, Balkema Publishers, Rotterdam, 1996. 490 p. ISBN 90 5410 828 2

Konferencia kiadványok



Jármai K., Farkas J. (Eds.): **Design, fabrication and economy of metal structures: International Conference Proceedings**, Miskolc, Hungary, 2013, 24 - 26 April, Springer Verlag, Heidelberg, 2013. 667 p.



Jármai K., Farkas J. (Eds.): **Design, fabrication and economy of welded structures: International Conference Proceedings**, Miskolc, Hungary, 2008, 24 - 26 April, Horwood Publishers, Chichester, UK, 2008. 582 p. ISBN: 978-1-904275-27-5

TÖBBSZINTŰ OPTIMÁLÓ ALGORITMUS ALKALMAZÁSA

APPLICATION OF MULTILEVEL OPTIMIZATION ALGORITHM

Dr. Kota László *, Prof. Dr. Jármai Károly **

ABSTRACT

In our industry researches we often face very difficult problems where ordinary algorithms fail to find the global optimum. Mostly they have difficult, high-dimensional count, very large state space where even the concept of direction and distance are non-existent and have to be defined, the neighborhood in the state space also needs definition. In these cases, these terms are often defined and calculated by heuristic functions. On these problems the applied optimization methods often fail, they stuck in local optima, working very slowly and find suboptimal solution. So, we decided to try to link optimization methods and create multi-level optimization methods to cope these problems. As a base concept in the first stage we use some simple, fast, rapidly converging algorithm, then some finer grade algorithm like population-based swarm optimization method. In this paper we will show and evaluate some multi-level optimization methods tested on several test functions, comparing the convergence and computational needs.

1. BEVEZETÉS

A kutatásunk alapötlete a gyors globális és a lassabb lokális keresőalgoritmusok kombinációjának vizsgálata. Elsőként a Firefly algoritmust vizsgáltuk, mint lokális optimáló módszer, mivel ezt az algoritmust korábban többször is használtuk kutatásainkban, valamint számos publikációnk fűződik hozzá [1, 2, 3].

A Firefly algoritmus egy általános optimáló eljárás, általában gyors konvergenciával rendelkezik, számos probléma megoldására használható, ezek főleg folyamatos problémák, de különböző módosításokkal diszkrét állapottérben is használható. Gyors globális algoritmusnak első vizsgálatunk tárgyául a véletlen keresést választottuk, ami meglepő lehet, de ennek az algoritmusnak előnye a könnyű implementálhatóság mellett a gyorsaság és kis számításigény. A véletlen keresés kezdeti szakaszában nagyon gyorsan állít elő lehetséges megoldásokat, valamint gyorsan konvergál, így ideális választásnak tűnt a módszer kezdeti

vizsgálatára. Vajon a Firefly algoritmus hatékonysága növelhető ezzel a módszerrel?

2. TESZTFÜGGVÉNYEK

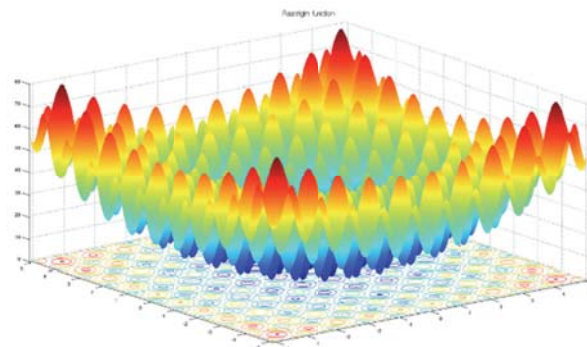
A szakirodalomban megszokott, jól bevált tesztfüggvényeket használtunk fel [4, 5]. De figyeltünk arra, hogy lehetőleg komplex sok lokális optimummal rendelkező tesztfüggvényeket használjunk a vizsgálatok folyamán (1, 2 és 3 ábra). A következő tesztfüggvényeket [6] vizsgáltuk:

Rastrigin függvény:

$$f(x) = 10d + \sum_{i=1}^d [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)] \quad (1)$$

ahol:

d: a dimenzió.



1. ábra Rastrigin függvény

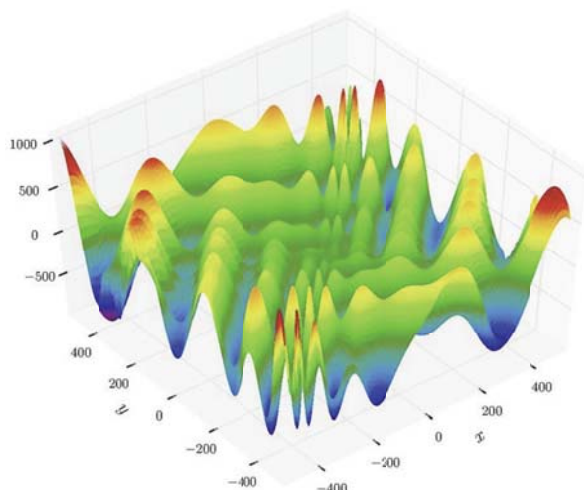
Minimuma: $f(0,0)=0$;
Keresési tér: $-5.12 \leq x, y \leq 5.12$

Eggholder függvény:

$$f(x, y) = -(y + 47) \sin \sqrt{\left| \frac{x}{2} + (y + 47) \right|} - x \sin \sqrt{|x - (y + 47)|} \quad (2)$$

* egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem Logisztikai Intézet

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

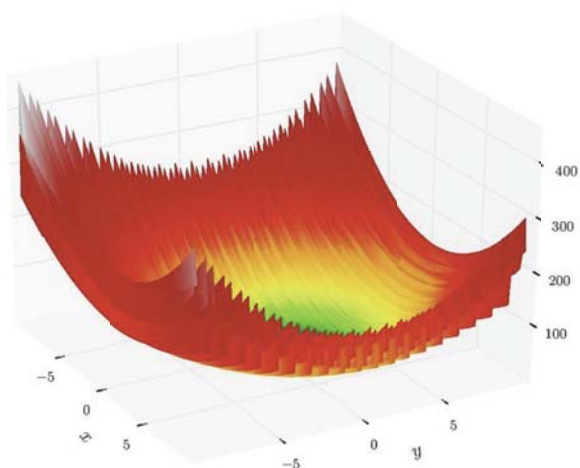


2. ábra Eggholder függvény

Minimuma: $f(512,404.2319)=-959.6407$;
Keresési tér: $-512 \leq x,y \leq 512$

Lévi N.13 függvény:

$$f(x,y) = \sin^2(3\pi x) + (x-1)^2(1 + \sin^2(3\pi y)) + (y-1)^2(1 + \sin^2(2\pi y)) \quad (3)$$



2. ábra Lévi N.13 függvény

Minimuma: $f(1,1)=0$;
Keresési tér: $-10 \leq x,y \leq 10$

3. AZ ALGORITMUS

Mint ahogy már említettük az első – globális – fázisban a véletlen keresés algoritmust alkalmaztuk. Első lépésben a kezdőpopulációt 100 véletlen egyeddel inicializáltuk, ami azt jelenti, hogy a célfüggvényt 100 véletlen kiválasztott helyen értékeltük ki. A vizsgálandó függvények könnyű cserélhetőségének érdekében nem csak a Firefly módszer hanem a véletlen keresés

módszer is populációt használt. Program-technikailag a populáció egy konténer objektum, melynek minden eleme szintén egy objektum, ezek az elemek reprezentálják a célfüggvény egy megoldását, valamint tartalmazzák az optimáló algoritmusok számára használható egyéb adatokat és metódusokat. Ezzel a módszerrel a populációt használó algoritmusok, mint például a genetikus algoritmus vagy az esetünkben használt Firefly algoritmus reprezentációja könnyen megvalósítható. Esetünkben a véletlen keresés módszer is ezt a populáció objektumot használta.

A globális keresés algoritmusának pszeudó kódja:

- a populáció inicializálása
- for x=0:population.count
 - o temp.x=Random; temp.y=Random
 - o temp.Fitness = CalculateTargetFuction(x,y)
 - o temp.Fitness < population[x].Fitness -> population[x]=temp
- endfor

A második fázisban a lokális keresési algoritmus, esetünkben a Firefly algoritmus kapja meg a populációt bementként. A lokális keresés algoritmusának pszeudó kódja:

- for i=0:population(firefly).count
- for j=0:population(firefly).count
 - if firefly[i].Fitness < firefly[j].Fitness -> MoveToward firefly[j]->firefly[i]
- endfor j
- endfor i
- for i=0:population(firefly).count
 - if firefly[i] not moved -> MoveRandom firefly[i]
- endfor i

A Firefly algoritmusnál minden mozgás az állapotterben egy függvénykiértékelést jelent.

4. TESZTFUTTATÁSOK

Rastrigin függvény tesztfuttatás: ahogy a kapott adatok is mutatják jelentős javulást értünk el a függvény kiértékelések számának csökkentése terén. A második futtatást vettük fel referenciapontnak, ahol a Firefly algoritmust egyedül futtatva az optimumérték már nem javult az iterációk számának növelésével. A futtatások során a két optimáló eljárás futás számának arányát, majd magát a futások számát is változtatva az eredeti függvény kiértékelés szám 6 százalékára csökkentettük a szükséges kiértékelési számot, valamint az optimum pontossága is jelentősen javult (1. táblázat).

1. táblázat Rastrigin függvény futtatás (RndS – Véletlen keresés, FF – Firefly algoritmus)

Futás	Iterációs szám		Fitnessz	X	Y	Függvény kiértékelések száma	Kiértékelések száma százalék
	RndS	FF					
1	0	200	0,01352	0,00686	0,00459	943947	195,64%
2	0	100	0,01352	0,00686	0,00459	482501	100,00%
3	0	50	0,02213	0,00425	-0,00967	243250	50,41%
4	50	50	0,00013	-0,00063	-0,00050	248925	51,59%
5	50	10	0,00058	0,00002	-0,00170	52288	10,84%
6	50	5	0,00242	0,00307	0,00168	29171	6,05%

2. táblázat Eggholder függvény futtatás (RndS – Véletlen keresés, FF – Firefly algoritmus)

Futás	Iterációs szám		Fitnessz	X	Y	Függvény kiértékelések száma	Kiértékelések száma százalék
	RndS	FF					
1	0	200	-959,606	512	404,4073	1006508	200,76%
2	0	100	-959,528	512	403,9173	501347	100,00%
3	0	50	-959,511	512	403,8936	249682	49,80%
4	50	50	-959,639	512	404,2674	248491	49,56%
5	50	10	-959,639	512	404,2674	53805	10,73%
6	50	5	-959,639	512	404,2674	29712	5,93%

3. táblázat Lévi N.13 függvény futtatás (RndS – Véletlen keresés, FF – Firefly algoritmus)

Futás	Iterációs szám		Fitnessz	X	Y	Függvény kiértékelések száma	Kiértékelések száma százalék
	RndS	FF					
1	0	200	8,67E-06	1,000122	1,002706	958042	196,28%
2	0	100	3,32E-05	1,000595	0,998815	488090	100,00%
3	0	50	3,32E-05	1,000595	0,998815	245813	50,36%
4	50	50	3,67E-06	1,000201	1,000173	250824	51,39%
5	50	10	6,32E-06	1,000116	1,002262	54921	11,25%
6	50	5	0,000281	0,998402	1,007171	29901	6,13%

Eggholder függvény tesztfuttatás: A második futtatási sorozatnál az Eggholder függvényt használtuk, az eredmények javulása hasonló az első esethez, a relatív értékek egy kicsit még jobbak is annál. Ebben az esetben a függvény kiértékelések száma az eredeti függvény kiértékelés szám 6 százaléka alá süllyedt (5,93%). Az összehasonlíthatóság miatt itt is ugyanazt az iterációs számot használtuk, mint az első esetben, habár az optimum javulás nem állt meg a második futtatásnál a Firefly algoritmus esetében a tendencia hasonló. Az Eggholder függvény esetén is nemcsak az iterációs szám csökkent drámaian, hanem az optimalás pontossága is javult ezzel párhuzamosan (2. táblázat).

Lévi N.13 függvény tesztfuttatás: Végül, de nem utolsósorban a Lévi N.13 függvényt vizsgáltuk. Ebben az esetben az optimalás függvény kiértékelési számának javulása nem olyan jó mint az előző esetben, de nemsokkal tér el tőle. Itt is az eredeti függvény kiértékelés szám majdnem 6 százalékára (6,13%) sikerült csökkenteni a kiértékelések számát habár ebben az esetben az optimum pontossága 5-7 tízezredet romlott. Az 5-ös esetben, ahol a pontosság még javult a relatív kiértékelés száma 11,25 százalékos, ami szintén egy nagyságrend javulás az eredeti értékhez képest (3. táblázat).

5. KÖVETKEZTETÉSEK

Ahogy a cikkünk is mutatja, lehet létjogosultsága a többfázisú algoritmusoknak, jól megválasztott lokális globális algoritmuspárokkal. Egy gyors globális keresőalgoritmus sokat segíthet egy lokális vagy egy általános keresőalgoritmusnak, ami drámaian kihat a számításgényre gyorsabb kiszámítást vagy kevesebb processzoridőt biztosítva. Az így nyert számítási kapacitást bonyolult problémáknál igen jelentős lehet. Jelenlegi fázisban még nem jelenthetjük ki a módszer általános alkalmazhatóságát, habár az eredmények jelentős javulást mutatnak. További futtatások, más tesztfüggvényekkel, valamint más algoritmuspárok kipróbálása, tesztelése is szükséges, mint például genetikus módszerek kombinálása véletlen kereséssel, valamint a Firefly algoritmus mellett más modern swarm módszer [7] tesztelése. Valamint szeretnénk a módszert kiterjeszteni sokdimenziós diszkrét problémákra. Hiszen sok valós probléma folyamatos függvényekkel nehezen leírható. Legtöbbször mátrixokkal, legtöbb esetben sok döntési változó állapotterben, akár a problémákra kifejlesztett metrikákkal és szomszédsági függvényekkel operálva [8, 9].

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

6. IRODALOM

- [1] KOTA L., JÁRMAI K.: Preliminary studies on the fixed destination mmtsp solved by discrete firefly algorithm, *Advanced Logistic Systems: Theory and Practice* (ISSN: 1789-2198) 7: (2) pp. 95-102. (2014)
- [2] KOTA L., JÁRMAI K.: Diszkrét Firefly algoritmus alkalmazási lehetőségének vizsgálata a beszállítók kiválasztásánál, *Multidiszciplináris Tudományok: a Miskolci Egyetem közleménye* 3:(1) pp. 153-162. (2013)
- [3] KOTA L., JÁRMAI K. Szentjánosbogár algoritmus diszkrétizálása több utazó ügynökös probléma megoldására, *GÉP* 65:(8) pp. 21-24. (2014)
- [4] JÁRMAI K., MARCSÁK G.Z., BARCSÁK C.: Application of test functions for the evaluation of

metaheuristic algorithms. In: *Proceedings of International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2015, Dubrovnik, Croatia, 09–11 September 2015*, pp. 251–255 (2015). ISSN 1849-0662

- [5] MOLOGA, M., SMUTNICKI, C.: Test functions for optimization needs, pp, 1–10 (2014). <http://www.robertmarks.org/Classes/ENGR5358/Papers/functions.pdf>. Accessed 27 Mar 2017
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Test_functions_for_optimization. Last Accessed 30 Mar 2017
- [7] BÁNYAI Á., BÁNYAI T, ILLÉS B.: Optimization of Consignment-Store-Based Supply Chain with Black Hole Algorithm,” *Complexity*, vol. 2017, Article ID 6038973, doi:10.1155/2017/6038973
- [8] FARKAS, J., JÁRMAI, K.: *Optimum Design of Steel Structures*. Springer, Heidelberg (2013). 288 p. ISBN 978-3-642-36867-7. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-36868-4>
- [9] KOTA, L., JÁRMAI, K.: Mathematical modelling of multiple tour multiple traveling salesman problem using evolutionary programming. *Appl. Math. Model.* 39(12), 3410–3433 (2015). doi:10.1016/j.apm.2014.11.043

IPARI ROBOT ÉS MANIPULÁTOROK KUTATÁSA ÉS ALKALMAZÁS JÁRMŰ-ÉS AUTÓIPARI MÉRNÖKI TERÜLETEKEN, ÁTTEKINTÉS

RESEARCH AND APPLICATION OF INDUSTRIAL ROBOTS AND MANIPULATORS AT CAR- AND VEHICLE ENGINEERING, A REVIEW

Hazim Nasir Ghafil¹ Dr. Jármái Károly²

ABSTRACT

The application of industrial robots and manipulators at car- and vehicle industry is more and more popular. This meets the requirements due to cost reduction, precision work and rapid manufacturing. This paper shows the application of robots in welding, cutting, grinding, painting, etc. This operation requires skilled workforce and is time-consuming. Using robots, one can increase productivity and quality in this area. This work will explore the use of robot manipulators and their various applications in the automotive and vehicle industries, as well as the relationship between applications and optimized robot manipulators, and robotic statistics around the world.

Keywords: Robotics, Optimization, Robot Application, Industrial Robots

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a robotok nagy szerepet játszanak az emberi élet minden területén [1,2,3], mert az igény az alacsony költségű, magas színvonalú és gyorsan előállított termékek iránt egyre növekszik. Ez a munkavállalók számára is új helyzetet teremt, mivel ezek a robotok különösen előnyösek lehetnek, veszélyes munkakörnyezetekben, vagy nehéz környezeti feltételek mellett [4,5,6]. A járműipar és az egyéb gépjárműgyártás olyan területek, melyek a fent említett okok miatt egyre inkább robotizálnak. Axiomatikusan a robotok specifikációja függ az alkalmazástól, amely különböző feladat esetén különböző, mint például az összeszerelő robotok [7,8], amelyek nehéz alkatrészeket vagy PCB manipulátorokat mozgatnak, amelyeknek dinamikus terhelésük van. Természetesen mindkét példa pontos mozgást igényel. Az ipari robotok sok típusa létezik, és a cél és a kívánt feladatok szerint használják őket [9,10]. A leggyakrabban használt robotok a soros kialakítású robot manipulátorok, amelyeknél az egyes

merev test elemek, úgynevezett csuklókkal vannak összekötve [11], lásd az 1. ábrát.

A járműipar gyártási sorainál gazdaságilag nem kívánatos, hogy minden robot manipulátor ugyanolyan kialakítású legyen, mivel a robotok csuklói különböző terheléseknek vannak kitéve. Nyilvánvaló, hogy a robot manipulátor az összeszerelési sorban más kialakítású, mint a festési vagy hegesztési sorokon. Ezért szükséges a manipulátorok és a csuklók optimális kialakítása [12,13]. Egy másik tény is figyelembe kell venni az autógyártás robot manipulátorainak használatával kapcsolatban, nevezetesen azt, hogy a manipulátorok munkaterülete vagy konfigurációs területe statikus vagy dinamikus akadályokat tartalmazhat, ami a robotoknál útvonaltervezést tesz szükségessé. Ezek a pályák csak egy előre meghatározott útvonal-készletet tartalmazhatnak [14] a Descartes-i térben, statikus környezet esetén statikus útvonalakat, dinamikus környezet esetén, pedig folyamatosan változó útvonalakat jelentenek [15]. Mindkét esetben ezeknek az útvonalat adó pontoknak a kiválasztása a konfigurációs térből a robot csuklói ismeretében az inverz kinematika módszer segítségével határozhatók meg [16].

2. ÚTVONAL ÉS TRAJEKTÓRIA TERVEZÉS

Az elmúlt évtizedek során robotokkal foglalkozó szakemberek figyelmét a robot manipulátorok kötötték le, mivel ezeknek széleskörű alkalmazási lehetőségei vannak számos iparágban.

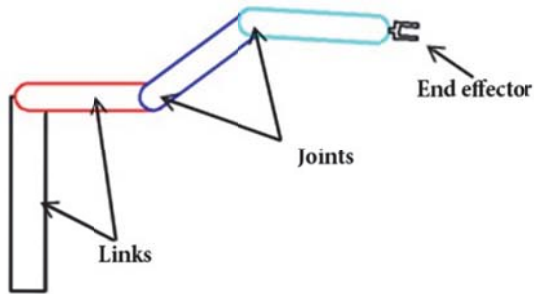
A robotmozgásban a legfontosabb feladat, hogy a robot elérési pontját a legrövidebb úton tervezze meg, ami kevesebb időt igényel, és kevesebb energiát használ a működése során. A tervezés fő előnye, hogy lehetővé teszi a robot számára, hogy komplex célokat érjen el [17]. Például egy robot számára, hogy egy konfigurációból egy másikba menjen át egy zsúfolt környezetben. Az útvonaltervezés csak egy geometriai művelet, amely leírja egy robot mozgásának útját, de nem írja le, hogy a mozgás miként történik. A csuklós

¹Idoktorandusz., Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet
² egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

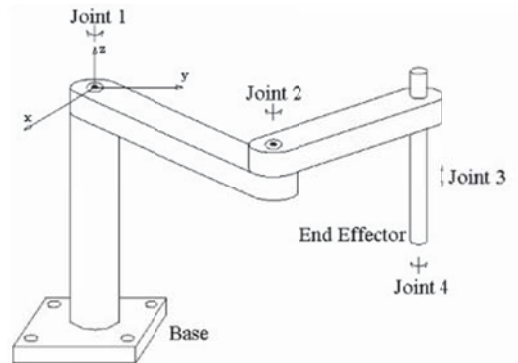
robot manipulátorok útvonalterve általában nagyobb kihívást jelent, mint a mobil robotok esetében, a nagy szabadságfok miatt. A robot manipulátor különböző iparági alkalmazásokban történő használatának fő

kialakítás kulcsa az, hogy minden alkalmazáshoz megfelelő pályautvonal tervet kell készíteni, ahol a pályán a sebességre, az erőre és a gyorsításra vonatkozó mozgás leírása megtalálható [18,19,20].

a)



b)



1. ábra. (a) 5R manipulátor, (b) RRdR manipulátor (SCARA robot)

Minden ipari robot manipulátor alkalmazásánál van egy út, amely pontokból álló pályát tartalmaz, minden pontot 3x1 pozícióvektor és 3x3 orientációs mátrix képvisel, a vektort és az orientációs mátrixot egyetlen A 4x4 homogén transzformációs mátrix [9].

A 2. és 3. ábrák különböző pontokat mutatnak be egyetlen útvonalon. A pálya több, mint az egy-egy pontot összekötő vonal és további információkat igényel, illetve tartalmaz. Ahogy már említettük, meg kell adnunk a robot sebességét, gyorsulását és az erő nagyságát, amelyet leképezünk a robot mozgásteréből.

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

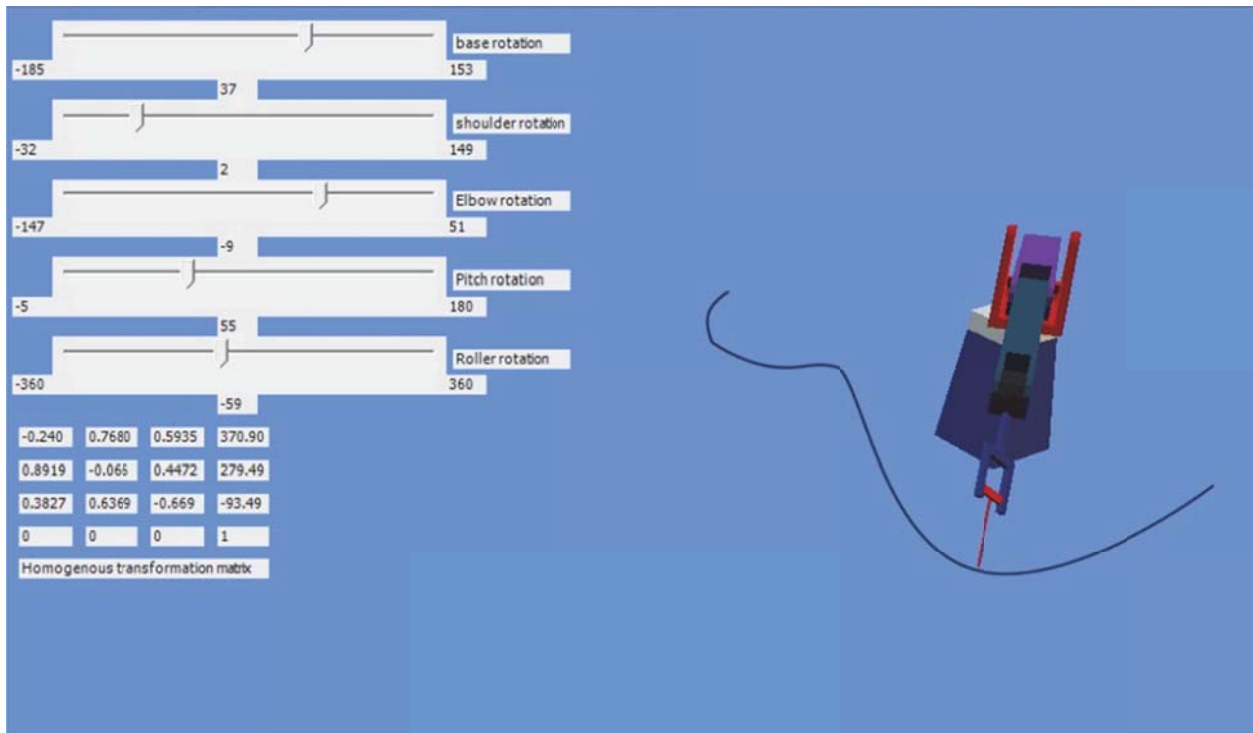
a)

The screenshot shows a software interface with a list of joint rotation values and a homogenous transformation matrix. The joint rotation values are: base rotation (-185, 153), shoulder rotation (-45, 149), Elbow rotation (-32, 34, -147, 51), Pitch rotation (-45, 180), and Roller rotation (-5, 21, -360, 360). The homogenous transformation matrix is:

0.6963	-0.707	0.1227	257.70
-0.696	-0.707	-0.122	-257.7
0.1736	0	-0.984	-43.16
0	0	0	1

Homogenous transformation matrix

b)



2. ábra. (a) és (b) Különböző robot konfigurációk az útvonal különböző pontjaiban

3. Optimalás

Ebben a részben megpróbáljuk bemutatni, hogy mi a kapcsolat az optimalás és a robot alkalmazás között? Röviden az optimalizálás a helyi minimumok és/vagy maximumot keresését jelenti egy bizonyos tartományban egy adott célfüggvényénél [21]. Az előző részben megmutattuk, hogy egy konkrét robot manipulátor használata a különböző ipari alkalmazásokban egy jól definiált pályát jelent. Ez nem egyszerű művelet, ha figyelembe vesszük, hogy minden induló és célpontot összekötő útvonal során a robotnak több száz közbenső pontja is lehet, a variánsok száma végtelen számú lehet a kezdő és végpont között. A probléma még összetettebb lehet, ha a sebesség, a gyorsulás és az erő értéke a pálya minden egyes pontjában szükség van. Mindazonáltal a számítástechnika és számos heurisztikus és biológiai inspirált algoritmus kifejlesztése megkönnyíti a fent említett végtelen számú útvonal optimalizálását egyetlen megoldásra, így egy adott ipari alkalmazásra az optimalizációs technikák javaslatot adnak, hogy mely megfelelő pályát kell követni.

Az optimalizációs módszerek felhasználásával egyes mérnöki elemek tervezése valósult meg, ahol először a probléma matematikai modellje került meghatározásra és a maximális terhelhetőség, vagy a minimális vastagság meghatározásával került sor az optimális megoldás kialakítására és még több más feltételt alkalmaztak, ami például a repülőgép súlyának vagy költségének [22] csökkentését eredményezte.

A kutatók évtizedek óta számos optimalizációs algoritmust alkalmaznak számos tudományterületen [23], ezeknek az algoritmusoknak a csoportja: A csillag, Hangyaboly, Méhraj, Genetikus, Mesterséges neurális hálózat, Részecske csoport, Harmónia keresés, és mások. Volt amikor két vagy több algoritmus hibridje került bevezetésre az optimalizációs folyamatban. Az útvonal optimális megoldásának megtalálásakor a szükséges idő és energia minimálisra csökkentése volt a cél, azaz az optimalizációs környezetbarát eljárásnak tekinthető, valamint növeli a robotok élettartamát, ami gazdaságossági szempont.

4. Robot manipulátorok a járművekben

A mechanikus műveletek nagy része a jármű végleges alakját, előállítását szolgálja. Műveletei az öntés, vágás, hegesztés, összeszerelés és festés, ezeknek a műveleteknek a sorrendje eltérhet, de ez nem okoz jelentős eltérést. Ebben a részben elmagyarázzuk ezeknek a műveleteknek néhány jellemzőjét.

4.1 Öntés

Az öntés a különböző anyagok felolvasásán keresztül jelenti a termékek előállítását, öntő formákba öntését. Ezen a területen a robotokat öntőformák kialakítására használják, ahol 3D-s nyomtatással vagy fűrésszel, marással valósul meg a szerszám kialakítása. Ebben a folyamatban a robotok alkalmazása például az

anyagmozgatásban a kemencétől az öntőformába, sokkal biztonságosabb, mint a dolgozóké.

4.2 Kőszőrülés és polírozás

A robotok alkalmazásával az öntött termékeket gyártása pontosan elvégezhető, valamint a nem kívánt sorják eltávolítása és a végtermék polírozása. Nyilvánvaló, hogy ez a munka szakmailag hozzáértő dolgozókat igényel, és több időt vesz igénybe, mint a robotokkal elvégzett hasonló munka. A kőszőrülő robotok különböző területeken való felhasználása széleskörű, például vízalatti szerkezetek, mint a gátkapuk, ahol az anyag eltávolítás arányát is meghatározták [24], turbina gyártásánál és javításánál [25]. Az anyag eltávolítási arány [26] a legfontosabb szempont a kőszőrülésnél, és itt nemcsak gazdasági, hanem biztonságossági szempontokat is előnyben kell részesíteni, különösen olyan veszélyes helyeken, mint a nukleáris erőmű, ahol kőszőrülő robot manipulátort használtak a berendezés csővezeték rendszerének legyártásánál [27]. A kőszőrülő robotok általában kőszőrű korongokat használnak, de a robotos szalagkőszőrülés [28] szintén alkalmazott technológia, mely növeli a termelékenységet és a bonyolultabb felületek kőszőrülését teszi lehetővé. Néhány kutatás a kőszőrülés hőtermelésének és -eloszlásának vizsgálatát végezte [29], amelyek fontosak a kristályszerkezeti tulajdonságok előre jelzésénél bizonyos hőmérsékleti fokon a kőszőrült területen.

A polírozási folyamat a végső felületi finomságot és a fényes megjelenést biztosítja a felületeknél [30,31]. Polírozó robotokat széles körben használnak különböző iparágakban, mint például gránit csillogású fémlemezeknél stb. Egyes tanulmányok különböző módszereket alkalmaznak a polírozási folyamat követésére, mint a gépi látás [32] és szenzoros megfigyelés [33].

4.3 Vágás

A gyártók régóta használják a vágógépeket az alkatrészek gyártására. 3 tengelyes, vagy még összetettebb CNC vagy robot manipulátor használata esetén különböző összetett formák alakíthatók ki. A robot manipulátorok alkalmazása vágásra széleskörű alkalmazást jelent a különböző autóiparhoz tartozó iparágak területein [34]. A robotok soros vágása a kis merevség esetén jól használható [35] az úrhajózási és a járműiparban, ahol a forgácsolási erők és a gravitáció helymeghatározási hibákat eredményezhetnek, de egyes megoldások ezt a problémát azáltal, hogy bevezetnek egy optimálást a szerszám pozicionálásánál [36, 37, 38]. Ezen új technikák csillapítással ellátott vezérlőrendszert használnak a vágógépen, amely pontosabbá tette a forgácsolási folyamatokat [39].

4.4 Szerelés

A különböző alkatrészek összeszerelése egy meglehetősen összetett feladatot jelent, mint például egy autómotor, vagy az egész autó összeszerelése, és ez általában monoton és időigényes folyamat, ami a robot manipulátorok alkalmazását megfelelő alternatívává teszi. A robotizált összeszerelési művelet klasszikus megközelítése a grafikus mozgástervezés, bár más stratégiákat is használtak, mint például a gépi látás alapú módszerek [40], továbbá az összeszerelő robotok felszerelhetők érzékelőkkel és jól programozhatók, hogy biztonságos legyen az adott munkaterületen együtt dolgozni emberekkel [41]. Az ember és a robot [42,43] közötti együttműködés szintén alkalmazott megoldás, mivel nagyon hasznos egyes műveletnél. Az összeszerelés a fent említett eljárások között különös gondosságot igényel, mivel ez a folyamat magában foglalja a jármű egyes részeinek összerakását, amelyek nagy tömegűek lehetnek, vagyis a robot manipulátorainak csuklóin és karjain nagyobb feszültségeket jelentenek, ezért ezek a terhelések, valamint a ciklikus terhelés és fáradás mind figyelembe kell venni a manipulátorok kialakításakor. Számos tanulmány megkülönböztette a pálya tervezést [44] és a sebesség és a minőség közötti kompromisszum kialakítását, abban az esetben, ha az összeszerelési eljáráshoz tartozik.

4.5 Festés

A festés robotpálya-optimalása az offline kísérleti algoritmus segítségével történt [45]-ben, feltételezve, hogy nincs szingularitás és redundancia.

Néha a festés nem pusztán egy olyan anyagdarabot takar, amelynek egy egységes bevonórétege van, hanem művészeti jellege lehet, mint a kínai festészetnek. Ezt a műveletet robotizálni lehet, mivel a festést különálló részekre bontva minden egyes részhez egy pályát generált [46], ez hasznos különösen az autóipar számára, ahol néha szükség van logó vagy művészeti ábra kinyomtatására.

4.6 Hegesztés

A hegesztés, vagy a hegesztett terület szilárdsága számos tényezőtől függ. Például az elektróda sebessége a kívánt nagyságú legyen és a kívánt útvonalon mozogjon. Az elektróda és a hegesztett felület közötti távolság, a hegesztési pálya alakja pl. cikkcakk, körkörös és így tovább, mind hatással vannak az eljárásra. Az előzőekben említett tényezőknél a legjobb választás a hegesztés az előre beprogramozott robot manipulátorokkal [47]. A hangya kolónia és a genetikai algoritmus hibrid algoritmusát [48] alkalmazták egy hegesztő robot útvonaltervezésében, ahol a hangyakolónia előnyös szerepet tölt be az algoritmus gyors

konvergenciájánál, valamint a lokális optimalás GA mutációját használta ki. Ugyanígy ezt a hibrid algoritmust alkalmazták a hegesztési robotok munkabeosztásánál [49].

A hegesztés paramétereit úgy optimalták, hogy egy olyan relációs modellt alakítottak ki, amely a legkevesebb kísérleti számot igényli hegesztési termelés kialakításához [50]. Ezt a mesterséges neurális hálózattal végzett ortogonális teszt kombinációjával valósították meg. Egy másik hegesztési paraméter optimalást hajtottak végre a válaszfelület módszer, a genetikai algoritmus és a neurális hálózat segítségével [51]. A hegesztőrobotokat különböző módokon igyekeztek könnyebben kezelhetővé és produktívabbakká tenni, mint például a beszádfelismerés [52] alkalmazásával, hogy a robot manipulátorokat könnyebben kezeljék a preoperábilis időszakban. Az egyik dinamikus szimulációs szoftvercsomag a RecurDyn, amely felhasználható a hegesztőrobotok szimulálására és több olyan információ visszajuttatására, mint például a motorok specifikációja vagy gravitációs kiegyenlítés témája [53].

Hibrid diszkrét PSO algoritmust vezettek be a hegesztőrobotok termelési hatékonyságának javítása érdekében ezen robotok útvonaltervezésének javítására [54].

Egy mozgó hegesztő robotot két optimalási modellel hoztak létre a mozgásprobléma megoldására, és megoldást adtak "komplex, mindenféle pozíciójú hegesztési műveletre" [55]. Bizonyos gyártási esetekben az ipari robotoknak többféle feladatot kell elvégezniük, például különböző varratok hegesztésével, és ezek a feladatok ismétlődően előfordulnak, van egy módszer [56], amely javítja a gyártási területek sorozatos feladatainak gyártási idejét a végrehajtás szabadsága mellett.

A legtöbb ipari robot manipulátornál létezik olyan rezgésprobléma, amely a robot motorokból származik, vagy a dinamikus mozgások miatt adódik. A minimális ívű és minimális távolságú pályák kombinációja hatékony kinematikai rendszert eredményez [57]. A

hegesztési folyamatban két együtt dolgozó manipulátor elméleti és kísérleti szempontból is emulálásra és vizsgálatra került [58]. Az emulálás a két robot esetében olyan pályatervezésnek számított, ahol a tervezés végrehajtásához a genetikai algoritmust alkalmazták.

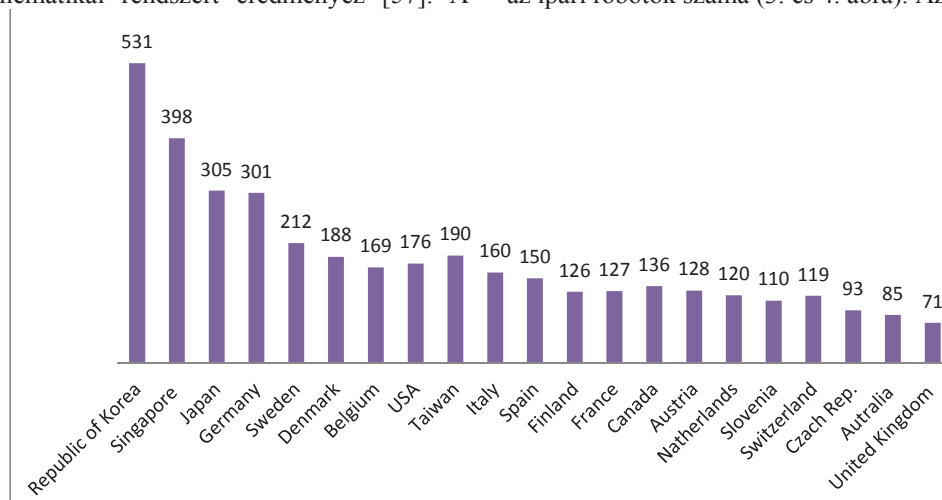
5. Optimalás és robot tervezés

Az előzőekben leírtak bizonyították, hogy a robot útvonalának és pályájának optimalása a közös a különböző alkalmazású ipari robotok esetén. Ebben a részben a gyakorlati alkalmazás és a robot közötti kapcsolat kerül bemutatásra.

Először is, minden robottervező a megfelelő robot kialakítására törekszik a megfelelő alkalmazáshoz, hogy kielégítsék a felhasználók azon igényét, ami a gazdaságosságra vonatkozik. Különösen igaz ez az autópárhazban, mivel ez az iparág többszörös robotcélú, és sokszor egyetlen robotot alkalmaz minden területhez. Így ebből a pontból sok tervező már évek óta dolgozik azon, hogy olyan optimalási módszereket használjon, melyek a megfelelő robot megfelelő alkalmazásának megtervezéséhez felhasználhatók. A legutóbbi időkből a topológia optimalást használják robotok tervezésére [59,60,61], például olyan algoritmusokat, mint a nemlineáris Levenberg-Marquardt [62] módszer azért, hogy a csomópontok közötti optimális hosszúság elérése mellett csökkenjen a hiba a végfelhasználói pozícióban és orientációban. Ezek a példák és még sokan más azt mutatják be, hogyan lehet alkalmazni a robot optimalási technikákat.

6. Statisztikák

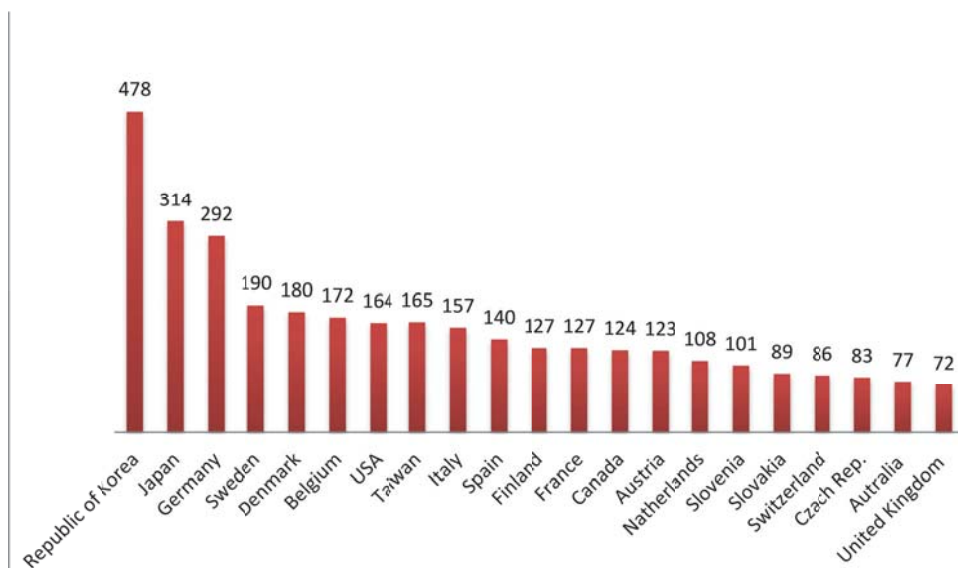
Az ipari robotok világszerte gyorsan terjednek a különböző országok gyártói közötti verseny következtében, és a megbízható statisztikák a robotok számának gyors növekedésére utalnak az elmúlt néhány évben. Az IFR [63] Nemzetközi Robot Szövetség által kiadott jelentés mutatta, hogy egy év alatt hogyan nőtt az ipari robotok száma (3. és 4. ábra). Az észak-



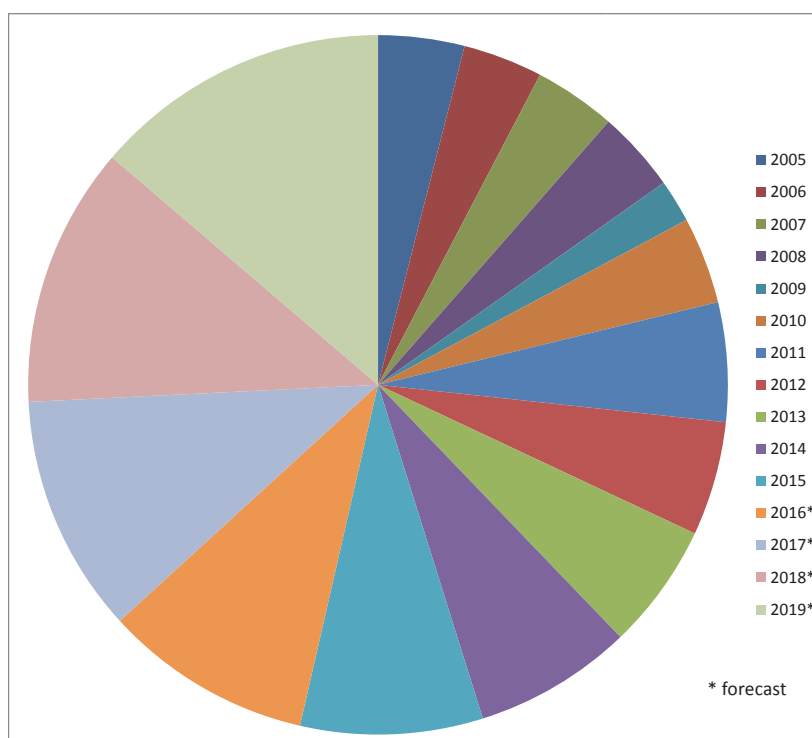
3. ábra. A többcéllú ipari robotok száma (minden típus) per 10,000 alkalmazott a feldolgozó iparban 2015-ben

amerikai robotrendelések és leszállítások [64] mutatják a legfrissebb növekedéseket. Az iparág megrendelése a robotok esetében 61% -kal nőttek az összeszerelés területén és 24% -kal a ponthegesztésnél, valamint a fogyasztási cikkek és az élelmiszeripar 32% -kal

növelték a robotok megrendelését. Az 5. ábra mutatja, hogy az elmúlt években hogyan fejlődött a robotok száma világszerte [65]. Mindenesetre számos jelentést [66] tettek közzé, hogy megmutassák az ipari robotok világméretű növekedését



4. ábra. A többcélú ipari robotok száma (minden típus) per 10,000 alkalmazott a feldolgozóiparban 2014-ben



5. ábra Az ipari robotok éves igénye 2005-2019 között

7. Összefoglalás

Ebben a tanulmányban egy áttekintést készítettünk a robotok alkalmazásáról az autóiparban. A gyártók

törekednek a költségek csökkentésére, a pontos munkavégzésre és a gyors gyártásra, amire a verseny szorítja és ehhez az ipari robotok használatával jutnak el. A járműiparban a robotok egyik legfontosabb

alkalmazási területe a hegesztés. A robotok használata ennél a műveletnél időmegtakarítást és nagyobb pontosságot eredményez. A robotok alkalmazása növelheti a termelékenységet és a minőséget minden gyártási technológiánál, mint például a festés és az anyagmozgás, és ezáltal előnyös lehet a robotok használata. Ez a cikk nemcsak a robot manipulátorokat és a különböző alkalmazásokat vizsgálja az autópárhán és a járműiparban, hanem az alkalmazások és az optimált robot manipulátorok közötti kapcsolatot is.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

9. IRODALOM

- Morteza Daneshmand et al.: Medical robots with potential applications in participatory and opportunistic remote sensing: A review, *Robotics and Autonomous Systems*, 95, 160-180 (2017).
- Hesheng Wang et al.: Trajectory planning of tokamak flexible in-vessel inspection robot”, *Fusion Engineering and Design*, 98–99, 1678–1682 (2015).
- Newton Spolaor: Robotics applications grounded in learning theories on tertiary education: A systematic review, *Computers & Education*, 112, 97-107 (2017).
- Varun Gopinath: Risk Assessment Process for Collaborative Assembly – A Job Safety Analysis Approach, 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, 199 – 203 (2016).
- Varun Gopinath: Safe Assembly Cell Layout through risk assessment – An Application with Hand Guided Industrial Robot, The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 430 – 435 (2017).
- George Michalos: ROBO-PARTNER: Seamless Human-Robot Cooperation for Intelligent, Flexible and Safe Operations in the Assembly Factories of the Future, Conference on Assembly Systems and Technologies and systems, 71 – 76 (2014).
- Aljaž Kramberger: Generalization of orientation trajectories and force-torque profiles for robotic assembly, *Robotics and Autonomous Systems* 98, 333–346 (2017).
- Sotiris Makris et al.: Dual arm robot in cooperation with humans for flexible assembly, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66, 13–16 (2017).
- Mark W. Spong: Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, Wiley & Sons Inc., First Ed. (2005).
- John J. Craig: *Introduction to Robotics, Mechanics and Control*, Pearson Prentice Hall, Third Edition, (2005).
- Hazim Nasir Ghafil et al.: A Virtual Reality Environment for 5-DOF Robot Manipulator based on XNA Framework, *International Journal of Computer Applications*, 113 (3) (2015).
- Tuomo Kivelä et al.: A generic method to optimize a redundant serial robotic manipulator's structure, *Automation in Construction*, 81, 172–179 (2017).
- Alaa Hassan and Mohammad Abomoharam: Modeling and design optimization of a robot gripper mechanism, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 46, 94–103 (2017).
- Robins Mathew et al.: Trajectory Tracking and Control of Differential Drive Robot for Predefined Regular Geometrical Path, *Procedia Technology*, 25, 1273-1280 (2016).
- Adem Tuncer and Mehmet Yildirim: Dynamic path planning of mobile robots with improved genetic algorithm, *Computers and Electrical Engineering*, 38, 1564–1572 (2012).
- Iliukhin V.N. et al.: The Modeling of Inverse Kinematics for 5 DOF Manipulator, *Procedia Engineering*, 176, 498-505 (2017).
- Lars Blackmore and Brian Williams: Optimal Manipulator Path Planning with Obstacles using Disjunctive Programming, *American Control Conference*, 14-16 (2006).
- Serdar Kucuk: Optimal trajectory generation algorithm for serial and parallel manipulators, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 48, 219-232 (2017).
- Aljaž Kramberger et al.: Generalization of orientation trajectories and force-torque profiles for robotic assembly, *Robotics and Autonomous Systems*, 98, 333-346 (2017).
- Elias K. Xidias: Time-optimal trajectory planning for hyper-redundant manipulators in 3D workspaces, available online: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584516302563>
- Hazim Nasir Ghafil: Inverse Acceleration Solution for Robot Manipulators using Harmony Search Algorithm, *International Journal of Computer Applications*, 144 (6) 1-7 (2016).
- József Farkas and Károly Jármái: *Optimum design of steel structures*, book, Springer Verlag (2013).
- Van-Oanh Sai et al.: Comparative Study on Recent Development of Heuristic Optimization Methods, *Third International Conference on Computing Measurement Control and Sensor Network (CMCSN)*, 68 – 71 (2016).
- Dominique Thuot et al.: Remote robotic underwater grinding system and modelling for rectification of hydroelectric structures, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29, 86–95 (2013).
- Stéphane Agnard et al.: Material removal and wheel wear models for robotic grinding wheel profiling, *Procedia Manufacturing*, 2, 35 – 40 (2015).
- Farzad Rafieian et al.: Angular analysis of the cyclic impacting oscillations in a robotic grinding process, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 44, 160–176 (2014).
- Pie Yu: Research and application of piping inside grinding robots in nuclear power plant, *Energy Procedia*, 127, 54–59 (2017).
- Dong Zhang et al.: Dexterous space optimization for robotic belt grinding, *Procedia Engineering*, 15, 2762 – 2766 (2011).
- Amir Masoud Tahviliana et al., “Experimental and finite element analysis of temperature and energy partition to the workpiece while grinding with a flexible robot, *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 2292– 2303(2013).
- Dieste J.A. et al.: Automatic grinding and polishing using Spherical Robot, *Procedia Engineering*, 63, 938 – 946 (2013).
- Fengjie Tian et al.: Modeling and control of robotic automatic polishing for curved surfaces, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 14, 55–64 (2016).
- Zhao-jun Yang et al.: A Novel Vision Localization Method of Automated Micro-Polishing Robot, *Journal of Bionic Engineering*, 6, 46–54 (2009).
- Segreto T. et al.: Cognitive decision making in multiple sensor monitoring of robot assisted polishing, *Procedia CIRP*, 33, 333 – 338 (2015).

34. Yi Liu et al.: Porcine automation: Robotic abdomen cutting trajectory planning using machine vision techniques based on global optimization algorithm, *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 193–200 (2017).
35. Alexandr Klimchik et al.: Identification of the manipulator stiffness model parameters in industrial environment, *Mechanism and Machine Theory*, 90, 1–22 (2015).
36. Berend Denkena and Thomas Lepper: Enabling an Industrial Robot for Metal Cutting Operations, *Procedia CIRP*, 35, 79 – 84 (2015).
37. Ulrich Schneider et al.: Compensation of Errors in Robot Machining with a Parallel 3D-Piezo Compensation Mechanism, *Procedia CIRP*, 7, 305 – 310 (2013).
38. Klimchik A. et al.: Experimental study of robotic-based machining, *IFAC-Papers on Line* 49 (12), 174–179(2016).
39. Taylor, C M: Process Damping and Cutting Tool Geometry in Machining, available online: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:43095855.
40. Weiwei Wan: Teaching robots to do object assembly using multi-modal 3D vision, *Neurocomputing*, 259, 85–93 (2017).
41. Sotiris Makris et al.: Dual arm robot in cooperation with humans for flexible assembly, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 66, 2017, pp. 13–16.
42. Xi Vincent Wang et al.: Human–robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, volume 66, (2017), pp. 5–8.
43. Stefania Pellegrinelli et al.: Motion planning and scheduling for human and industrial-robot collaboration, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 66, (2017), pp. 1–4.
44. Anna Valente et al.: Smooth trajectory generation for industrial robots performing high precision assembly processes, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 66, (2017), pp. 17–20.
45. Heikki Hyotyniemi: Locally Controlled Optimization of Spray Painting Robot Trajectories, *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Motion Control Year: 1990*, Volume: 1, pp. 283 – 287.
46. Fenghui Yao and Guifeng Shao: Painting Brush Control Techniques in Chinese Painting Robot, 2005 IEEE International Workshop on Robots and Human Interactive Communication, pp. 462-467.
47. Frederico A. Ramalho Filho et al.: Development of Parallel Manipulators for Welding Robots, *Robotics (ISR)*, 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK) pp. 1 - 6.
48. Haiming Shen: A Study of Welding Robot Path Planning Application Based on Genetic Ant Colony Hybrid Algorithm, 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), pp. 1743-1746.
49. Zhengda Meng and Qinqi Chen: Hybrid Genetic-Ant Colony Algorithm Based Job Scheduling Method Research of Arc Welding Robot, *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*, pp. 718-722.
50. Hu Hai-yan et al.: The research on parameters optimization of power battery pack welding based on neural network, 2016 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS) pp. 457 – 460.
51. Praga-Alejo R.J.: Optimization welding process parameters trough response surface, neural network and genetic algorithm, *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference 2008*, pp. 393-399.
52. Ande Stanly et al.: Parametric studies on motion intensity factors in a Robotic Welding using Speech Recognition, 2016 IEEE 6th International Conference on Advanced Computing, pp. 415-420.
53. Yan-Shen Wang: Dynamic simulation and gravity balancing optimization of spot welding robot based on RecurDyn, *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation August 7 - 10, Beijing, China*, pp. 1905-1910.
54. Xuewu Wang et al.: Welding Robot Path Optimization Based on Hybrid Discrete PSO, 2014 Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design, pp. 187-190.
55. Tao Zhang: Optimal Motion Planning of All Position Autonomous Mobile Welding Robot System for Fillet Seams, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, VOL. 10, NO. 4, OCTOBER 2013, pp. 1147 - 1151
56. Sergey Alartsev and Frank Ortmeier: Improving the Sequence of Robotic Tasks with Freedom of Execution, 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014) September 14-18, 2014, Chicago, IL, USA, pp. 4503-4510.
57. Hang Dong: An Effective Technique to Find a Robot Joint Trajectory of Minimum Global Jerk and Distance, *Proceeding of the 2015 IEEE International Conference on Information and Automation Lijiang, China, August 2015*, pp. 1327-1330.
58. Gan Yahui et al.: Emulating manual welding process by two cooperative robots, *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference July 28-30, 2014, Nanjing, China*, pp. 8414-8420.
59. Sébastien Briot and Alexandre Goldsztej: Topology optimization of industrial robots: Application to a five-bar mechanism, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 120, February 2018, pp. 30-56.
60. Sofiane Belhabib and Sofiane Guessasma: Compression performance of hollow structures: From topology optimisation to design 3D printing, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 133, Nov. 2017, pp. 728-739.
61. HaoWang et al.: An approach of topology optimization of multi-rigid-body mechanism, *Computer-Aided Design*, Volume 84, March 2017, pp. 39-55.
62. Tuomo Kivelä et al.: A generic method to optimize a redundant serial robotic manipulator's structure, *Automation in Construction*, Volume 81, September 2017, pp. 172-179
63. World robotics report available online: https://ifr.org/downloads/press/02_2016/2016FEB_PI_IFR_Roboterdichte_nach_Regionen_QS1.pdf
64. Robotics Industries Association, available online: https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-News/2016-Breaks-Records-for-North-American-Robot-Orders-and-Shipment/content_id/6378
65. Latest forecast from the International Federation of Robotics (IFR), available online: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-report-2016>
66. Executive Summary World Robotics 2016 Industrial Robots, available online: https://ifr.org/img/uploads/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_20161.pdf

ALAP, HIBRID ÉS TÖBBSZINTŰ EVOLÚCIÓS ALGORITMUSOK

BASIC, HYBRID AND MULTILEVEL EVOLUTIONARY ALGORITHMS

Nagy Szilárd*, Dr. Jármay Károly**

ABSTRACT

These methods are well used to solve nonlinear, multi dimensional engineering problems, where the usage of gradient based methods is difficult, or can't be used. In the last few years, research of these methods is got great emphasis. In this paper three basic algorithm - namely Random search, Firefly algorithm and Differential evolution -, hybrid- and multilevel methods of their combinations are introduced.

1. BEVEZETÉS

Az evolúciós algoritmusok természet inspirálta sztochasztikus, meta-heurisztikus kereső, optimáló eljárások. Jól használhatók nemlineáris, sok változós mérnöki feladatok megoldása során. Olyan esetekben is eredményre vezethetnek, ahol már a hagyományos gradiens alapú módszerek nehezen, vagy egyáltalán nem alkalmazhatóak, vagy nem adnak eredményt. A meta-heurisztikus algoritmusoknak két dologra van szükségük, a lehetséges megoldásokat kiértékelő függvényre, és az azokat generáló eljárásokra. E kettő megléte esetén már képes lehetséges optimumot találni. Természetükből adódóan ritkán vagy egyáltalán nem mondható meg, hogy a kapott megoldás lokális, vagy globális optimum-e? Biztosan csak az állítható, hogy a kapott eredmény jobb, mint a kiindulási állapot.

Amit az ember gondolkodással próbál megoldani, arra a természet sok esetben talál a változatosság, és a szelekció eszközeit felhasználva hatékonyabb megoldásokat. A külső hatásokra adott véletlenszerű válasz (mutáció), eredményezi az egyedek sokszínűségét. A túlélésért folytatott harcban, az élelem után való folyamatos kutatásban stb. az életképesebb egyedek vagy kiválogatódnak, tulajdonságaik tovább

örökítésének lehetőségét magukban hordozva. A biológiai szaporodást, mutációt és szelekciót alkalmazzák a különböző Genetikus algoritmusok (GA) [1], vagy az E.Coli baktériumok szaporodása (BFOA) [2]. Élelem keresési stratégián alapul az egyik legrégebben publikált algoritmus a Hangya kolónia optimalizáció (ACO) [3], vagy a méh algoritmus (ABC) [4,5,6]. A felsoroltakon kívül még rengeteg, az előzőekhez hasonló algoritmus létezik és van használatban. A teljesség igénye nélkül néhány ezek közül: Részecske csoport módszer (PSO) [7], Denevér algoritmus (BATA) [8], Kakukk keresés (CS) [9], Kulturális algoritmus (CA) [10].

Az evolúciós algoritmusok a keresési teret részhalmozokra, populációkra bontják. A populációk egyedei egy-egy állapotot, lehetséges megoldást reprezentálnak. Az egyedek tovább bonthatók tulajdonságokra, melyek a tervezési változóknak feleltethetők meg. Az egyedek mutáció, keresztezés és szelekció ismételt alkalmazásával fejlődnek generációról - generációra. Matematikailag egy-egy vektorral fejezhető ez ki

$$\vec{x}_i^{(G)} = (x_{i,1}^{(G)}, x_{i,2}^{(G)}, \dots, x_{i,n}^{(G)}, \dots, x_{i,D}^{(G)}) \quad (1)$$
$$\forall i \in [1; NP]$$

ahol G az adott generáció, D a célparaméterek száma és NP a populáció mérete. Az egyedekről általánosságban elmondható, hogy

$$\forall x_{i,n}^{(G)} \in \mathbb{R} \cap [x_{lb,n}; x_{ub,n}] \quad (2)$$

ahol $x_{lb,n}$ és $x_{ub,n}$ az n -dik egyed (tervezési paraméter, függvény változó, stb.) alsó és felső határa.

* PhD hallgató, Miskolci Egyetem; szerszám és készülék tervező mérnök, Aventics Hungary Kft.

** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem

2. VÉLETLEN KERESÉS

A Véletlen keresés (RS) az egyik legegyszerűbb meta-heurisztikus optimáló algoritmus. A szó szoros értelmében nem tekinthető evolúciós módszernek, mert semmilyen biológiai analógiát nem tartalmaz. Teljesen véletlenszerű, hogy generációnként talál-e jobb megoldást. E tulajdonsága miatt optimálásra önmagában nem is szokták használni, hanem csak kezdeti populáció generálásához.

Az RS a keresési térben véletlenszerűen választ egy új pozíciót. Ha az új pozícióhoz tartozó fitness érték jobb az előzőnél, akkor megtartja, egyébként nem frissíti az aktuális egyedet.

$$x_{i,j}^{(R)} = (x_{ub,j} - x_{lb,j})rand(0,1) + x_{lb,j} \quad (3)$$

$$x_{i,j}^{(G+1)} = \begin{cases} x_{i,j}^{(R)} & \text{ha } f(x_i^{(G+1)}) < f(x_i^{(G)}) \\ x_{i,j}^{(G)} & \text{egyébként} \end{cases} \quad (4)$$

3. DIFFERENCIÁLIS EVOLÚCIÓ (DE)

A Differenciális evolúció egy a klasszikus eljárások közül. Először 1990-es években Price és Storn mutatta be [11]. Az alap ötlet, hogy a populáció generációnkénti fejlődéséhez vektor különbségeket használ. Ez az eddig használt genetikus algoritmusokhoz képest nagy számítási teljesítmény javulást eredményezett, mert a populáció egyedei valódi alakjukban szerepelnek és nincs szükség komplikált kódolásra.

A DE önhivatkozó reprodukciós sémája eltér más evolúciós algoritmusokétól. Az első generációt leszámítva, az adott populáció, illetve annak egyedei véletlenszerűen kombinálásra kerülnek, hogy kialakítsák a következő populációt az alábbi lépések szerint:

3.1. Mutáció

Teljeség igénye nélkül néhány mutációs stratégia:

$$\bar{v}_i^{(G)} = \bar{x}_{r_1}^{(G)} + F(\bar{x}_{r_2}^{(G)} + \bar{x}_{r_3}^{(G)}) \quad (5)$$

$$\bar{v}_i^{(G)} = \bar{x}_{best}^{(G)} + F(\bar{x}_{r_1}^{(G)} + \bar{x}_{r_2}^{(G)}) \quad (6)$$

$$\bar{v}_i^{(G)} = \bar{x}_i^{(G)} + F(\bar{x}_{best}^{(G)} + \bar{x}_i^{(G)}) + F(\bar{x}_{r_1}^{(G)} + \bar{x}_{r_1}^{(G)}) \quad (7)$$

$$\bar{v}_i^{(G)} = \bar{x}_{best}^{(G)} + F(\bar{x}_{r_1}^{(G)} + \bar{x}_{r_2}^{(G)}) + F(\bar{x}_{r_3}^{(G)} + \bar{x}_{r_4}^{(G)}) \quad (8)$$

$$\bar{v}_i^{(G)} = \bar{x}_{r_1}^{(G)} + F(\bar{x}_{r_2}^{(G)} - \bar{x}_{r_3}^{(G)}) + F(\bar{x}_{r_4}^{(G)} - \bar{x}_{r_5}^{(G)}) \quad (9)$$

ahol $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 \in [1; NP]$ egymástól független véletlen egész szám, $F > 0$ valós konstans (lépték tényező) és x_{best} az eddig talált globális minimum helye. A leggyakrabban használt stratégiák 12 az eredeti (5) és (7)

3.2. Keresztezés

$$u_{i,j}^{(G)} = \begin{cases} v_{i,j}^{(G)} & \text{ha } rand(0,1) < CR \text{ vagy } j = j_r \\ x_{i,j}^{(G)} & \text{egyébként} \end{cases} \quad (10)$$

ahol $CR \in [0,1]$ keresztezési arány, j_r véletlen egész szám. A CR értékét a gyakorlatban gyakran 0,9-re választják 12.

3.3. Szelekció

$$\bar{x}_i^{(G+1)} = \begin{cases} \bar{u}_i^G & \text{ha } f(\bar{u}_i^G) < f(\bar{x}_i^{(G)}) \\ \bar{x}_i^G & \text{egyébként} \end{cases} \quad (11)$$

Megvizsgálja, hogy az új egyed fitness értéke jobb-e az aktuálisnál. Ha igen, megtartja, egyébként elveti. Ez a változás biztosítja, hogy a módszer folyamatosan tartson egy jobb megoldás felé.

Az eredeti DE algoritmusban az F és CR paraméterek hasonlóan az NP -hez a keresési folyamat során nem változnak. Azóta több kutatás is javasolta ezek futásidejű adaptív változtatását. F -re és CR -re ad módszert a [12], a populáció méretére pedig [13,14].

A differenciális evolúció pszeudokódját az 1. algoritmus szemlélteti. A sorok között könnyen felismerhető a korábban említett három lépés. Mutáció 4. sor, keresztezés 5-12. sorok és végül a szelekció 13-17. sor. A kezdeti populáció inicializálás történhet bármilyen eloszlású véletlen szám alapján, de ajánlott az egyenletes eloszlású.

1. P populáció inicializálása
2. **while** kilépési feltétel nem igaz **do**
for $i = 1; i \leq NP; i = i + 1$ **do**
 \bar{v}_i^G mutációs vektor előállítás
 $j_{rand} \in [1; D]$ véletlen egész szám

```

for  $j = 1; j \leq D; j = j + 1$  do
  if  $\text{rand}(0,1) < CR$  then
     $u_{i,j}^G = v_{i,j}^G$ 
  else
     $u_{i,j}^G = x_{i,j}^G$ 
  end
end
if  $f(\bar{u}_i^{(G)}) < f(\bar{x}_i^{(G)})$  then
   $\bar{x}_i^{(G+1)} = \bar{u}_i^{(G)}$ 
else
   $\bar{x}_i^{(G+1)} = \bar{x}_i^{(G)}$ 
end
end
end
3. end

```

1. algoritmus DE pseudokódja

4. SZENTJÁNOSBOGÁR ALGORITMUS (FA)

A Szentjánosbogár algoritmust először [15] javasolta 2009-ben. Napjainkban az egyik legígéretesebb rajntelligencián alapuló optimalizáló eljárás [16], a szentjánosbogarak idealizált szociális viselkedést imitálja.

1. Minden szentjánosbogár uniszex, így egy bogár vonzza az összes többi függetlenül a nemétől.
2. Vonzás arányos a fényerőséggel és függ a köztük lévő távolságtól. Két világitó szentjánosbogár közül a kevésbé fényes elmozdul a fényesebb felé.
3. Fényességet a célfüggvény fitness értéke befolyásolja.
4. Ha nem talál saját magánál fényesebb bogarat akkor véletlen mozgásba kezd.

A módszer nagyon hasonlít a Részecske csoport (PSO) algoritmushoz, minél jobb megoldást talál az egyed, annál erősebb fényt bocsájt ki, ami oda vonzza a populáció többi egyedét az adott területre.

A legegyszerűbb esetben egy szentjánosbogár I fényessége x pontban választható $I \propto f(x)$ alakban. A β vonzás azonban relatív, minden egyed más és másképpen érzékeli. Így hát meghatározásánál figyelembe kell venni az i és j bogár közötti r_{ij} távolságon túl, a közeg által elnyelt fény mennyiségét is.

$$\beta(r) = \beta_0 e^{\gamma r^m} \quad (12)$$

ahol β_0 a vonzeró $r = 0$ távolságnál, γ pedig konstans. A költségesen számolható exponenciális függvény helyett használható a sokszor gyorsabban kiszámítható (13) alak is.

$$\beta(r) = \frac{1}{1 + r^2} \quad (13)$$

Távolság a i és j egyed között Euklideszi távolságként definiálható

$$r_{ij} = \|\bar{x}_i^{(G)} - \bar{x}_j^{(G)}\| = \sqrt{\sum_{k=1}^D (x_{i,k}^{(G)} - x_{j,k}^{(G)})^2} \quad (14)$$

ahol $x_{i,k}^{(G)}$ a G . generáció i szentjánosbogár térbeli koordinátájának k komponense.

Az i egyed új pozíciója, mozgása egy fényesebb j szentjánosbogár felé

$$\bar{x}_i^{(G+1)} = \bar{x}_i^{(G)} + \beta(r_{ij})(\bar{x}_j^{(G)} - \bar{x}_i^{(G)})r + \alpha(\text{rand}(0,1) - 0,5) \quad (15)$$

ahol az egyenlet második fele egy α konstans paraméterrel arányos véletlen mozgás. Az előzőeket foglalja össze 2. algoritmus.

1. P populáció inicializálása
2. α, β_0, γ inicializálása
3. I_i fényerősség kiszámítása $\bar{x}_i^{(G)}$ pontban
4. **while** kilépési feltétel nem igaz **do**
for $i = 1; i \leq NP; i = i + 1$ **do**
for $j = 1; j \leq NP; j = j + 1$ **do**
if $I_j < I_i$ **then**
kiszámítása (14) alapján
szentjánosbogár mozgatása
 I_i frissítése
end
end
if nem történt mozgás **then**
véletlen mozgás
end
end
end
5. **end**

2. algoritmus FA pseudokódja

1. táblázat Szabványos tesztfüggvények

Név	Formula	Keresési tér	Globális minimum
Ackley	$-20 \exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{D}\sum_{i=1}^D x_i^2}\right) + \exp\left(\frac{1}{D}\sum_{i=1}^D \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	$x_i \in [-32.768, 32.768] \quad i = 1, 2, \dots, D$	$f(x^*) = 0, x^* = (0, 0, \dots, 0)$
Griewank	$\sum_{i=1}^D \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^D \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right)$	$x_i \in [-600, 600] \quad i = 1, 2, \dots, D$	$f(x^*) = 0, x^* = (0, 0, \dots, 0)$
Levy	$\sin^2(\pi\omega_1) + \sum_{i=1}^{D-1} (\omega_i - 1)^2(1 + 10\sin^2(\pi\omega_1 + 1)) + (\omega_D - 1)^2(1 + \sin^2(2\pi\omega_D))$ where $\omega_i = 1 + \frac{x_i - 1}{4} \quad i = 1, 2, \dots, D$	$x_i \in [-10, 10] \quad i = 1, 2, \dots, D$	$f(x^*) = 0, x^* = (1, 1, \dots, 1)$
Rastrigin	$10D + \sum_{i=1}^D (x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i))$	$x_i \in [-5.12, 5.12] \quad i = 1, 2, \dots, D$	$f(x^*) = 0, x^* = (0, 0, \dots, 0)$
Rosenbrock	$\sum_{i=1}^{d-1} (100(x_{i+1} - x_i^2))^2 + (x_i - 1)^2$	$x_i \in [-3, 10] \quad i = 1, 2, \dots, d$	$f(x^*) = 0, x^* = (1, 1, \dots, 1)$
Sphere	$\sum_{i=1}^d x_i^2$	$x_i \in [-5.12, 5.12] \quad i = 1, 2, \dots, d$	$f(x^*) = 0, x^* = (0, 0, \dots, 0)$
Zakharov	$\sum_{i=1}^d x_i^2 + \left(\sum_{i=1}^d 0.5ix_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^d 0.5ix_i\right)^4$	$x_i \in [-5, 10] \quad i = 1, 2, \dots, d$	$f(x^*) = 0, x^* = (0, 0, \dots, 0)$

5. TÖBB SZINTŰ ÉS HIBRID ALGORITMUSOK

A bemutatott alap eljárások önmagukban is hatékonyak, de egymással kombinálva ez a hatékonyság növelhető. Hibrid algoritmus képezhető, ha több eljárás ugyanazon populáció egy-egy részén párhuzamosan, vagy kvázi párhuzamosan dolgozik. Ezzel kiegészítve egymás hatékonyságát, növelve a konvergencia sebességét.

A FA és DE algoritmusnak is meg van a saját előnye, mindkettő széles körben használható optimalizációs problémák megoldására. A [17] javaslatot tesz egy hibrid algoritmusra, melyet hFADE-nek hív. A javasolt módszer egyesíti az FA és DE előnyeit. A FA algoritmus egy pontba vonzási mechanizmusával, valamint a DE keverési és szétszórási képességével, megnöveli a konvergencia sebességét és ugyanakkor az egyedek sokféleségét.

Az algoritmusok sok összetevője közül az intenzifikálás és a diverzifikálás (más néven a feltárás és a kiaknázás) a két legfontosabb jellemzője. A keresési terület globális szinten történő feltárásához szükséges egy jól működő diverzifikációs, feltárási stratégia. Az intenzifikációs, kiaknázási stratégia pedig a lokális keresésben segíti az egyedeket. Az algoritmusok pontossága, és sebessége növelhető e két képesség folyamatos egyensúlyban tartásával. A fenti mechanizmus eléréséhez a két eljárás kombinációját a 3. algoritmus foglalja össze.

A hibrid technológián kívül másik elgondolás lehet a kombinációra a többszintű algoritmusok alkalmazása. A [18] végzet kutatásokat ilyen téren (mRSFA). Az alap elgondolás, hogy az iterációs lépések első részében durva, és gyors keresést alkalmaznak a teljes keresési

téren egy gyors algoritmussal. A választott gyors algoritmus az RS, mivel könnyen implementálható és a függvény értékek kiszámításán túl nem igényel semmilyen más kiegészítő számítást.

Az optimalizálás második felében egy lassú, de jól konvergáló és sok esetben bizonyított eljárás kapja meg a populációt (FA). Ez már az előzőnél jóval lassabb módszer, mivel egy iterációs lépésen belül, komoly kiegészítő számításokat is igényel, és a függvény értéket legrosszabb esetben NP^2 -szer számolja ki. A mRSFA lépéseit a 4. algoritmus szemlélteti.

1. P populáció inicializálása
2. P véletlenszerű kettéosztása P_{DE} és P_{FA}
3. **while** kilépési feltétel nem igaz **do**
FA algoritmus végrehajtása P_{FA} -n
DE algoritmus végrehajtása P_{DE} -n
globális minimum frissítése
 P_{FA}, P_{DE} újra osztása véletlenszerűen
4. **end**

3. algoritmus hFADE pseudokódja

1. P populáció inicializálása
2. **while** 1. kilépési feltétel nem igaz **do**
for $i = 1; i \leq NP; i = i + 1$ **do**
új egyed generálása (3) alapján
globális minimum frissítése
end
3. **end**
4. **while** 2. kilépési feltétel nem igaz **do**
új egyedek generálása FA szerint
globális minimum frissítése
5. **end**

4. algoritmus mRSFA pseudokódja

A [18] eredményei alapján a konvergencia sebességben és megbízhatóságban nincs nagy különbség az alap Szentjánosbogár algoritmushoz képest. A futási idő, célfüggvény kiszámítási igénye viszont nagyban lecsökken az alap FA-hoz képest. A 18 végzett teszt alapján akár 50% - 90%-al is gyorsabb lehet kétváltozós függvények esetében. Természetesen ez nagyban függ a vezérlő paramétertől és magától a problémától is.

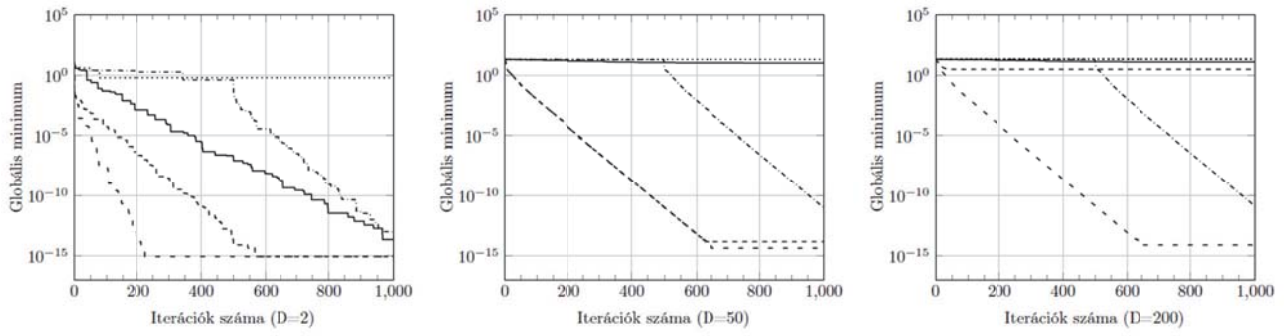
6. TESZT FÜGGVÉNYEK ÉS SZIMULÁCIÓ

A teszt függvények hasznosak az új és már meglévő evolúciós módszerek jellemzőinek - konvergencia sebessége, precizitás, hatékonyság stb. - kiértékelésére, összehasonlítására. A cikkben bemutatott algoritmusok hét szabványos függvény használatával kerülnek összehasonlításra. Ezeket a függvényeket az 1. táblázat foglalja össze. A függvények között vannak könnyen optimálható monoton és nehezebb, az optimum környezetében ellaposodó és sok lokális minimumot tartalmazó függvények. Utóbbiak globális minimumának a meghatározása általában nehezebb, mert ha a keresés során lokális minimum közelébe kerül az eljárás, onnan nehezen, vagy egyáltalán nem tud kijönni és jobb megoldást keresni.

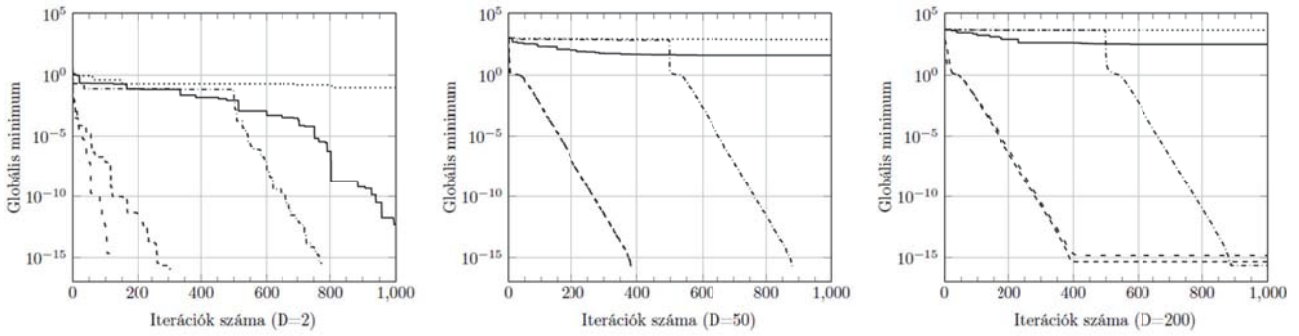
A szimulációk azonos körülmények között kerültek elvégzésre, ami az iterációk számában és populáció

méretében tükröződik. Az iterációk száma 1000, populáció mérete pedig függetlenül az optimalizáló paraméterek számától mindig $NP = 100$ egyed. A szakirodalmakban megtalálható legtöbb összehasonlítás általában kevés paraméterrel történik. Ettől a szokástól eltérően itt három különböző méretű paraméterszám kerül vizsgálatra. Az általánossá vált $D = 2$ -n kívül a $D = 50$ és már nagynak számító $D = 200$.

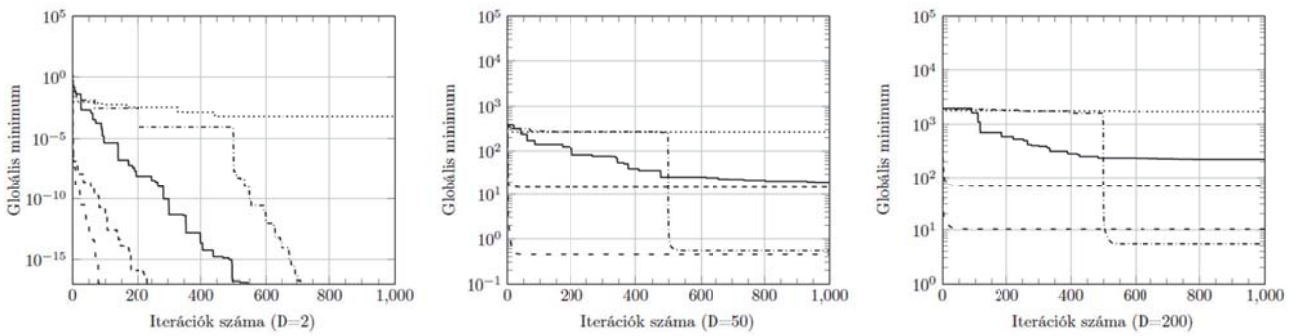
Az algoritmusok konstansai pedig megegyeznek a már korábban említett szakirodalmak ajánlásaival. A Differenciál evolúció esetén $F = 0,5$ és $C_r = 0,9$. A Szentjánosbogár esetén pedig $\beta_0 = 2$, $\gamma = \frac{1}{S^2}$ ahol S a változók átlagos tartománya, és $\alpha = 0,2 * 0,95^G$. A hibrid és több szintű algoritmusok konstansai megegyeznek az alap algoritmusoknál használtakkal. A hFADE esetén nem található szakirodalmi ajánlás, hogy milyen arányban érdemes szétosztani a populációt a két eljárás között. Itt 50% - 50%-ban lettek az egyedek szétosztva. A mRSFA esetén is az arány középúttal készült a szimuláció. Az iterációs lépések 50 %-ban dolgozik az RS és 50 %-ban az FA.



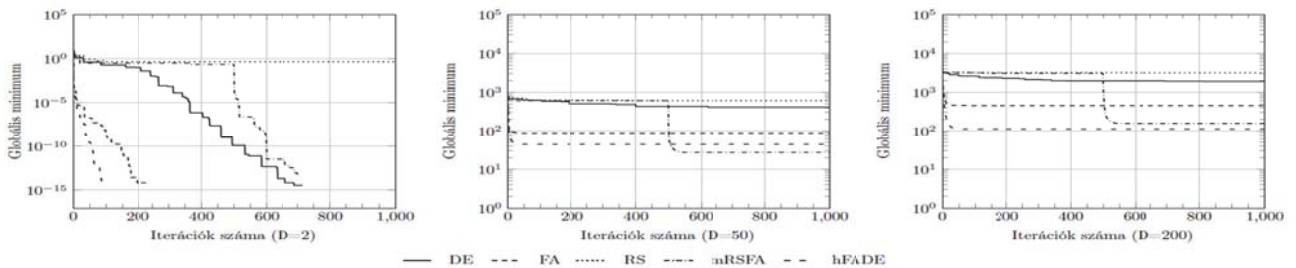
— DE --- FA RS -.- mRSFA -- hFADE
 1. ábra Konvergencia Ackley függvény esetén



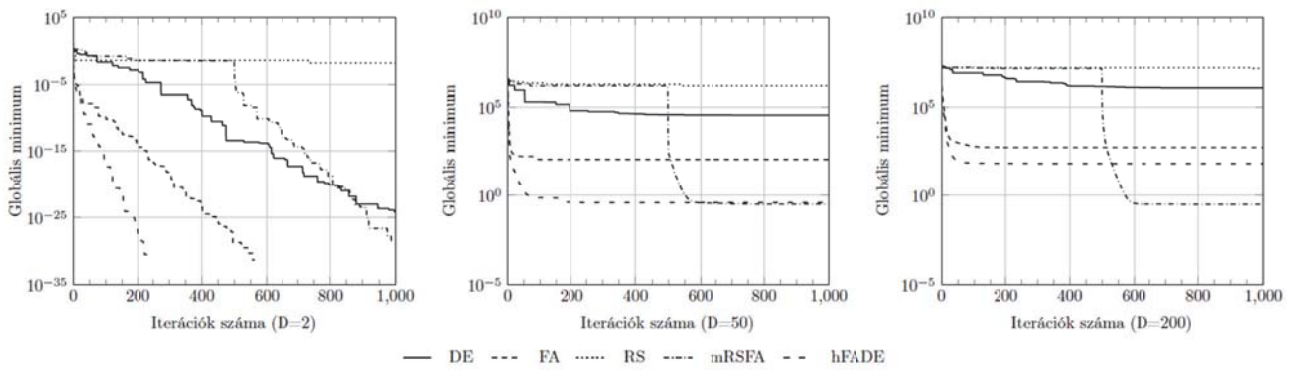
— DE --- FA RS -.- mRSFA -- hFADE
 2. ábra Konvergencia Griewank függvény esetén



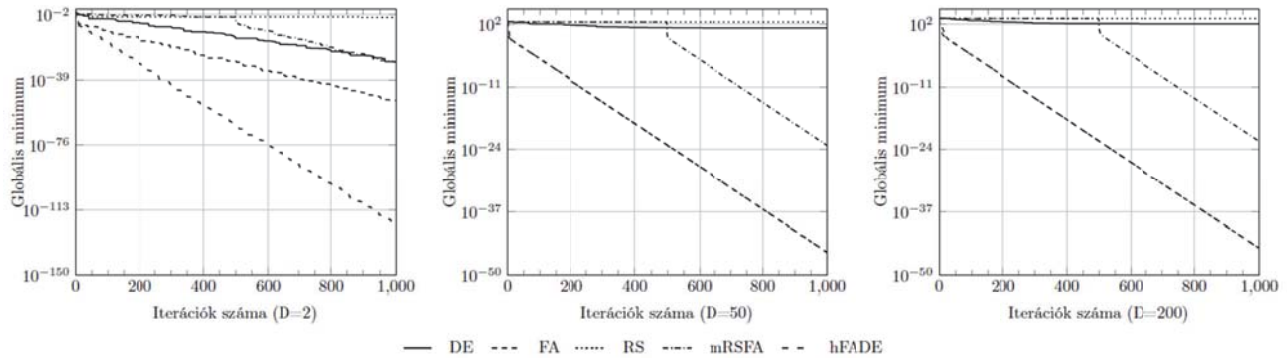
— DE --- FA RS -.- mRSFA -- hFADE
 3. ábra Konvergencia Levy függvény esetén



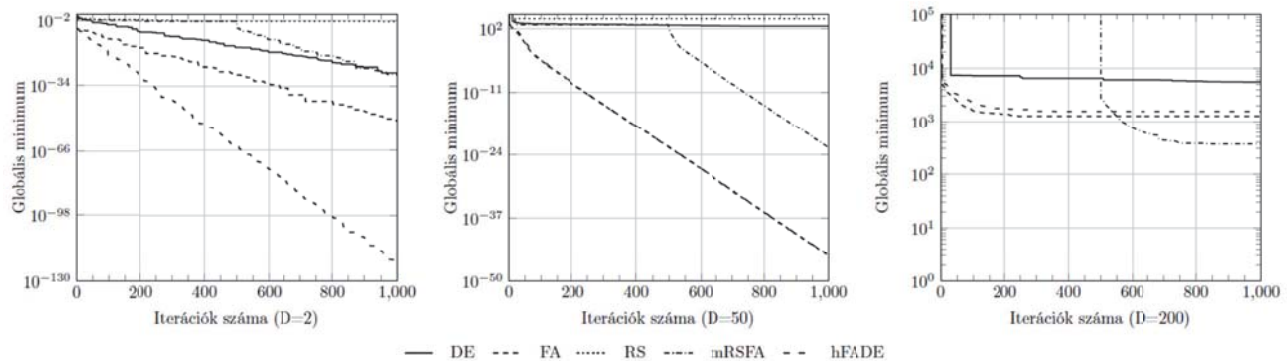
— DE --- FA RS -.- mRSFA -- hFADE
 4. ábra Konvergencia Rastrigin függvény esetén



5. ábra Konvergencia Rosenbrock függvény esetén



6. ábra Konvergencia Sphere függvény esetén



7. ábra Konvergencia Zakharov függvény esetén

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatásra kerültek alap és ezekből kombinált evolúciós módszerek, melyek különböző teszt függvényekkel lettek vizsgálva. Ezek eredményét az 1 - 7 ábrák szemléltetik. Balról jobbra a dimenziók száma $D = 2$, $D = 50$ és $D = 200$. Kis változójú

problémáknál mind az eredeti módszerek, mind a többszintű és hibrid módszerek gyorsan tartanak az optimum felé. A változók számának növekedésével ez a képesség egyre jobban romlik, és egyre nagyobb valószínűséggel csak lokális minimumot talál. Ez olyannyira megfigyelhető, hogy a $D = 200$ -as problémáknál közel biztosan kijelenthető, hogy lokális minimumot talál, ha létezik optimum.

Az összetett eljárások a jelen teszt függvényekkel végzett szimulációkban hatékonyabbak voltak az alap algoritmusoknál. Sajnos mivel az evolúciós módszerek sosem száz százalékban determinisztikusak, mint a gradiens alapúak, ezért teljes biztonsággal nem állítható, hogy minden létező problémánál hatékonyabbak lesznek. Csak a jelen teszt körülmények között voltak eredményesebbek és nagy rá a valószínűség, hogy a mérnöki problémák megoldása során is azok lesznek.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

9. IRODALOM

- [1] SIMON, D.: Evolutionary Optimization Algorithms, 2013
- [2] LIU Y., PASSINO K. M.: Biomimicry of Social Foraging Bacteria for Distributed Optimization: Models, Principles, and Emergent Behaviours, *Journal of Optimization Theory and Applications*, (2002), pp. 603-628.
- [3] COLORNI A., DORIGO M., M. V., Distributed Optimization by Ant Colonies, 1991.
- [4] KARABOGA D., BASTURK B.: A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm, *Journal of Global Optimization*", (2007), pp. 459-471.
- [5] KIRAN M., BABALIK A.: Improved Artificial Bee Colony Algorithm for Continuous Optimization Problems, *Journal of Computer and Communications*, (2014), pp. 108-116.
- [6] KARABOGA D., AKAY B.: A modified Artificial Bee Colony (ABC) algorithm for constrained optimization problems, *Applied Soft Computing*, (2011), pp. 3021-3031.
- [7] KENNEDY J., EBERHART R.: Particle swarm optimization, *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, (1995), pp. 1942-1948.
- [8] YANG XIN-SHE: A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm, *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*, (2010)
- [9] YANG X. S., SUASH D.: Cuckoo Search via Levy flights, *2009 World Congress on Nature Biologically Inspired Computing (NaBIC)*, (2009), pp. 210-214.
- [10] REYNOLDS R. G.: An introduction to cultural algorithms, *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Evolutionary Programming*, (1994), pp. 131-139.
- [11] STORN R., PRICE K.: Differential Evolution -- A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces, *Journal of Global Optimization*, (1997), pp. 341-359.
- [12] ZHENYU Y., KE T., XIN Y.: Self-adaptive differential evolution with neighbourhood search, *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, (2008), pp. 1110-1116.
- [13] BREST J., MAUVEC M. S.: Self-adaptive differential evolution algorithm using population size reduction and three strategies, *Soft Computing*, (2011), pp. 2157-2174.
- [14] BREST J., ZAMUDA A., B. B., M. S. M., V. Z.: High-dimensional real-parameter optimization using Self-Adaptive Differential Evolution algorithm with population size reduction, *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, (2008), pp. 2032-2039.
- [15] XIN-SHE YANG: Firefly Algorithms for Multimodal Optimization, *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications: 5th International Symposium*, (2009), pp. 169-178.
- [16] IZTOK F., XIN-SHE Y., JANEZ B., IZTOK F.: Memetic Self-Adaptive Firefly Algorithm, *Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation*, (2013), pp. 73-102.
- [17] ZHANG L., LIU L., XIN-SHE Y., DAI Y.: A Novel Hybrid Firefly Algorithm for Global Optimization, *PLOS ONE*, (2016), pp. 1-17.
- [18] KOTA L., JÁRMAI K.: Application of Multilevel Optimization Algorithms, *Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization: Proceedings of the 12th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO12)*, (2018), pp. 710-715.

TESTRESZABOTT ADDITÍV GYÁRTÁSÚ FÉM PROTÉZISEK ANYAGTULAJDONSÁGAI ÉS VIZSGÁLATUK

MATERIALS AND MEASUREMENTS FOR ADDITIVE MANUFACTURED CUSTOMIZED HUMAN IMPLANTS

Fehér Márk, Dr. Takács János BME KJK Gépjárműtechnológia Tanszék

ÖSSZEFOGLALÁS

Az orvosi implantátumok tervezése és gyártása komplex feladat. A megfelelő működéshez ezen protéziseknek különféle követelményeknek kell megfelelniük mind a geometria, mind az anyag oldaláról. Az anyag összetételének pontos meghatározása így kiemelten fontos, amelyre gyors és megbízható vizsgálati eredményt ad GDOES alkalmazása. Ez a publikáció egy ilyen mérés eredményeit mutatja be, kitérve az implantátum legfontosabb minőségi követelményeire.

ABSTRACT

Designing and manufacturing medical implants are complex tasks. These implants have to fit numerous requirements in their geometries and materials for a proper behaviour. To determine the exact composition of their materials is important, and by the use of GDOES we can get reliable and quick results about that. This presentation demonstrates the results of a GDOES measurement taking the implants' quality requirements into account.

1. BEVEZETÉS

Az orvosi implantátumok tervezése és gyártása komplex feladat. Valamennyi esetben egyénre szabott, szabálytalan geometriákat kell készíteni olyan drága anyagokból, melyeknek az élő szövetbe ültetéshez különféle követelményeknek kell megfelelniük. Így könnyen belátható, hogy hagyományos eljárásokkal csak magas költségek és sok idő árán lennének képesek ilyen protézisek gyártására. Ezeket a problémákat küszöbölik ki az additív gyártási eljárások. Az előadás

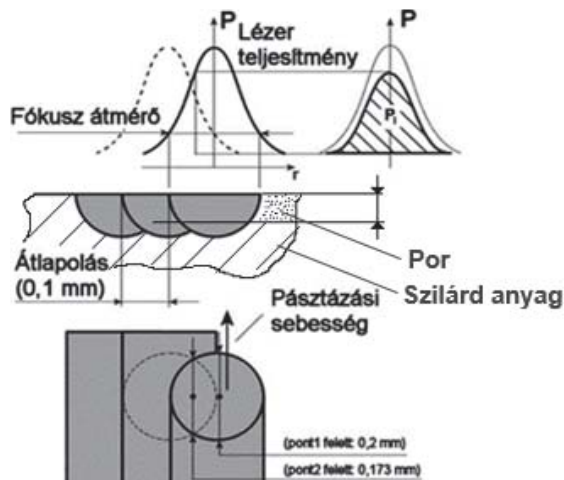
bemutatja a fémorból felépítő szelektív lézeres olvasztást, áttekinti a technológiát befolyásoló legjelentősebb tényezőket, ezek hatását a várható geometriára, szerkezetre. Kitér a beépítés során az élő szervezettel való felületi érintkezés szempontjából fontos követelményekre, kielégítésük módjára. Az anyagi megfelelés az egyik fontos összetevő. Az anyagösszetétel gyors és pontos meghatározására a „Glow-discharge optical emission spectroscopy (GDOES)” alkalmazása megfelelő megoldást jelenthet.

2. SZELEKTÍV LÉZERES OLVASZTÁS

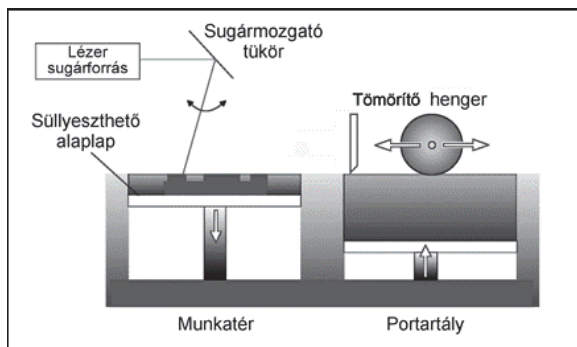
A szelektív lézeres olvasztás – vagy angol nevén Selective Laser Melting, SLM – egy additív gyártási eljárás. Az additív gyártás a rétegről rétegre építkező gyártási módszereket foglalja magába, amelyek egy része ismert, elsősorban a gyors prototípusgyártásban elterjedt (Rapid Prototyping – RP), azonban a technológia rohamos fejlődésének köszönhetően már bizonyos orvosi alkalmazásokhoz is megfelelő minőségű alkatrészek készíthetők vele.

A szelektív lézeres olvasztás során a rétegepítés fémpor (Ti6Al4V, 316L rozsdamentes acél stb.) és lézerek használataval történik. A porral feltöltött munkatérben a lézerek a megtervezett keresztmetszetben végigpásztázza, hatására a besugárzott területen a felterített porrágy a sugárban közölt és a porban elnyelt energia hevítő hatására megolvad, így az az adott rétegben és az alatta lévő réteggel is összeolvad, és a bepásztázott területek között is kohéziós kapcsolat jön létre. A pásztázás hatásmechanizmusát mutatja be az *1. ábra*. Miután egy réteg elkészült, az építési munkatér

tartálya a rétegvastagságnak megfelelő mérettel lejjebb süllyed, majd egy portartályból egy porterítő mechanizmus (pl. egy henger és a rétegvastagságot kalibráló penge) újabb réteg port juttat az addig elkészült rétegek fölé, a maradék túlsorduló por pedig egy gyűjtőbe kerül. Egy ilyen berendezés általános felépítése látható a 2. ábrán. A folyamat lépései addig ismétlődnek, amíg el nem készül az alkatrész.



1. ábra Az SLM hatásmechanizmusa [1]



2. ábra Az SLM berendezés általános működése [2]

3. IMPLANTÁTUMOK TERVEZÉSE, GYÁRTÁSA

3.1. A csont tulajdonságai

A csont 39%-ban szerves (95% kollagén, 5% proteoglykan), 49%-ban szervetlen anyagokat (kalcium hydroxiapatite kristályok) és 12%-ban folyadékot tartalmaz. A csontállománynak két típusa van, a tömör (cortical) és a szivacsos

(cancellous) csont. A tömör csont kemény, ez viseli a feszültség nagy részét, azonban szakadási nyúlása alacsony (~2%). A szivacsos csont porózusabb, sokkal nagyobb rugalmas alakváltozásra képes (~75%), viszont alacsony a teherbírása. A kétfajta állomány, az életkor, a nem, az életmód (pl. sportoló vagy sem) valamint a csont funkciója és testbeli elhelyezkedése (pl. lábujj- vagy lábszárcsont) együttesen alakítja a csont mechanikai tulajdonságait, így tehát azokat nem lehet egyértelműen meghatározni [3]. A csontrol azonban összességében elmondható, hogy az implantátumként használt fémekhez képest igencsak eltérő mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, melyet jól szemléltet az 1. táblázat.

1. Táblázat. Főbb implantátum anyagok és a csont néhány mechanikai tulajdonsága [4]

Anyag	E modulus [GPa]	Folyáshatár [MPa]	Szakítószilárdság [GPa]
Rozsdamentes acél	190	221-1213	586-1351
Co-Cr ötvözetek	210-253	448-1606	655-1896
Titán	110	485	760
Ti6Al4V	116	896-1034	965-1103
Tömör csont	15-30	30-70	70-150

3.1. Az implantátumok

Az implantátumok olyan, biológiailag megfelelő anyagból készült orvostechnikai eszközök, amelyek szándékosan kerülnek beültetésre az emberi testbe, és melyeket részben vagy egészben hámszövet fed majd be. Tervezésük során ügyelni kell arra, hogy behelyezéskor és a „karbantartások” alkalmával a lehető legkevésbé váltsanak ki invazív reakciókat a szervezetben [5].

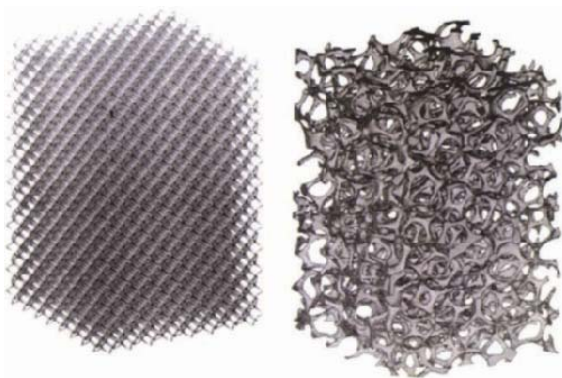
Az implantátumokkal szemben támasztott követelmények [6, 7] a biokompatibilitás (a szervezet ne lökje ki), a bioaktivitás (sejtek képesek legyenek megtapadni a falán), a megfelelő felületi minőség, megfelelő porozitás és pórusméret (sejtnövekedés

beindulhasson, szövet képződjön), megfelelő mechanikai tulajdonságok (ne károsítsa a környező csontállományt). Ez utóbbi követelmény magyarázatát a Wolff-törvény adja, mely a terhelő erőkből adódó feszültség átterhelődését jelenti a rugalmas csonttól a merevebb implantátumra (3. ábra). Ilyen hatásra csonttrikulás következhet be az implantátum körüli csontállományban, mely akár a beültetett „alkatrész” elvesztésével is járhat a teherviselésben.



3. ábra. Feszültség átterhelődés a csonttól az implantátumra [8]

Valamennyi fenti követelmény kielégíthető a szelektív lézeres olvasztás alkalmazásával olyan struktúrák gyártásával, melyek relatív rugalmassági modulusa közelít a csontéhoz (4. ábra).



4. ábra. Nyílt celluláris struktúrák az implantátumokhoz [9]

4. AZ SLM GYÁRTMÁNYOK MINŐSÉGÉT BEFOLYÁSOLÓ FŐBB TÉNYEZŐK ÉS HATÁSUK

A szelektív lézeres olvasztás eredménye a technológia összetettségéből adódóan számos tényezőtől (technológiai paramétertől) függ, ezek a következő alcsoportokba sorolhatók [10]:

1. lézersugár tulajdonságai (hullámhossz, sugár átmérő a bevilágított felületen, teljesítménysűrűség stb.)
2. alapanyag tulajdonságai (por szemcsemérete, olvadáspontja, nedvesítőképessége, folyékonysága stb.)
3. szkennelési paraméterek (pásztázási sebesség, vonalak távolsága, átlapolás mértéke, pásztázási stratégiák stb.)
4. környezeti tényezők (hőmérséklet, védőgáz atmoszféra, maradék O₂ szint stb.)

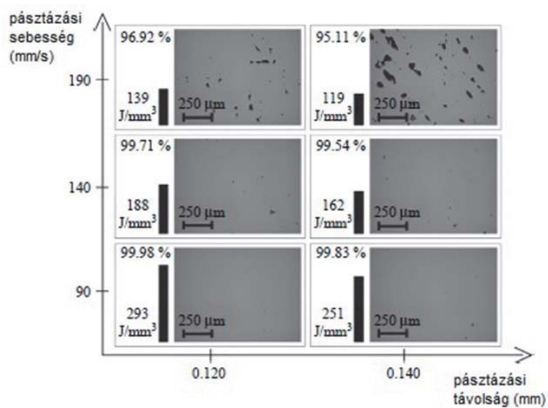
A legtöbb esetben azonban nincs lehetőségünk minden paramétert változtatni, a főbb, általában állítható tényezők a következőkben foglalhatók össze.

5.1 Energiasűrűség

Az egyik legbefolyásosabb megmunkálási paraméter az energiasűrűség, melynek képlete:

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t}$$

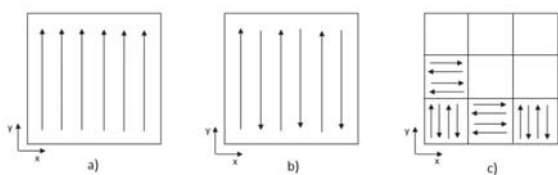
ahol E: energiasűrűség [J/mm³], P: lézersugár teljesítménye (W), v: pásztázási sebesség [mm/s], h: szomszédos pásztázási vonalak középvonalainak távolsága (angolul: hatch spacing) [mm], t: rétegvastagság [mm] [11]. Az energiasűrűség tehát egységnyi térfogatrészbe bevitt energiát jelent, mely több tényezőtől áll. Általánosságban elmondható, hogy ezen paraméterek – és összességében az energiasűrűség – megfelelő beállításával bármilyen alapanyag a megfelelő minőségűre alakítható [12]. Az energiasűrűség hatására mutat példát az 5. ábra, ahol az elkészült munkadarabok porozitásán keresztül figyelhető meg a paraméterek hatása.



5. ábra. Az energiasűrűség hatása a porozításra [11]

4.2 Pásztázási stratégiák

Pásztázási stratégia (6. ábra) a lézersugár végig vezetésének „szkenelésének” módját jelenti. Nagymértékben befolyásolja a testen belüli hőprofilok és a szövetszerkezet kialakulását és a szemcsék növekedésének irányát a megszilárdulás során. A stratégia megválasztása nemcsak a gyártás idejét, hanem a gyártmány minőségét is befolyásolja mind mechanikai (maradó feszültségek), mind érdességi szempontból. A sokáig általánosan az egyirányú (csak x vagy y tengely irányú) pásztázást használtak, amelyek a szkennelendő geometria függvényében eltérő hőmérsékleti gradienseket és rossz minőséget, nagy felületi érdességet eredményeztek. Valamivel jobb anyagtulajdonságokat biztosít, ha váltakozó irányban pásztázzák végig a keresztmetszetet. A legjobb végeredmény úgy érhető el, ha a teljes keresztmetszetet kisebb területekre bontjuk (pl. 5x5 mm-es négyzetekre), majd ezeket egyesével sorban haladva, az oda-vissza stratégiát választva, négyzetenként az irányt 90°-kal elforgatva, majd a rétegeket egymáshoz képest szintén 45-90°-kal elforgatva pásztázunk (sakk tábla-szerű stratégia, 6. ábra / c).



6. ábra. Pásztázási stratégiák. a) egyirányú, b) váltakozó irányú, c) sakk tábla-szerű

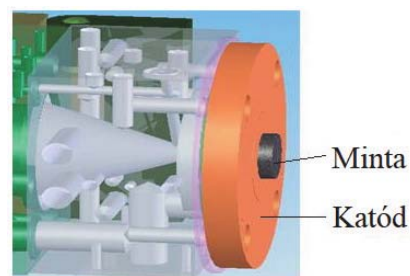
5. ÖSSZETÉTELVIZSGÁLAT

Ahhoz, hogy egy implantátum a fokozott egészségügyi követelményeket kielégítse, fontos, hogy az anyag összetétele megfeleljen a szigorú előírásoknak. A lézeres technológia következtében bármilyen zavaró tényező hatással lehet a folyamatra, megváltozhat az elkészült darab összetételében a szennyezőtartalom. Például a környezetből oxigén, nitrogén kerülhet az anyagba. valamint esetleg túlhevítési hatásokra bizonyos komponensek elgőzölgése esetén akár a fém komponensekben is eltérés fordulhat elő annak ellenére, hogy a gyártó berendezés általában minden technológiai jellemző szempontjából folyamatfelügyelt.

Ezért olyan anyagvizsgáló, összetétel gyorselmező szükséges a gyártóberendezés által előállított darabok gyors kontrolljára, ami a prototípus mintákkal egyidejűen, egy munkatérben előállított anyagvizsgáló mintákon meg tudja határozni az összetételt, a gázszennyezők (H, N, O) jelenlétét, esetlegesen a C-tartalom változását az alapösszetevőkön kívül, megfelelő pontossággal.

5.1 GDOES optikai emissziós spektrométer

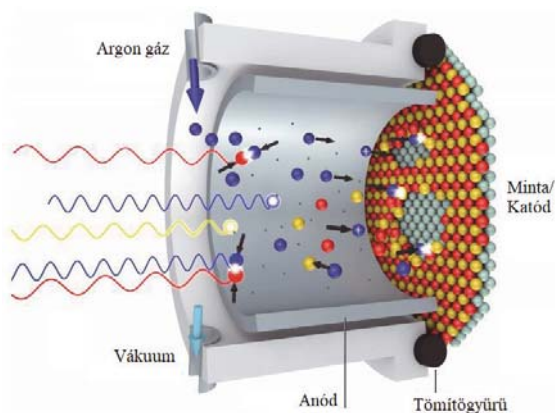
A gyűrűszerűen gerjesztett plazma kisüléssel leválasztó optikai emissziós spektrometria (angolul: Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy, röviden: GDOES) egy minőségi és mennyiségi összetétel elemzésre alkalmas eljárás fém és nem fém anyagok esetében egyaránt. A fényenergia forrása egy Grimm típusú kibocsátó cső, amely jellemzője az elektródák különleges elhelyezése.



7. ábra. A fénykibocsátó forrás vázlatja. A minta gumigyűrűn tömítve zárja le a katódon lévő furat körüli teret a vákuumtér létrehozásához [13]

Az egyenáram két elektródája egy üreges henger alakú anódból és egy katódból (a vizsgálandó darab) épül fel. A mintadarab közvetlenül a katódra kerül, és így az is katódként funkcionál. A darabnak, egy tömítő gyűrű felületén jól kell zárnia a teret, hogy vákuumot lehessen létrehozni, így a vizsgálandó mintán megfelelően sima sík felületet, kell kialakítani (7. ábra).

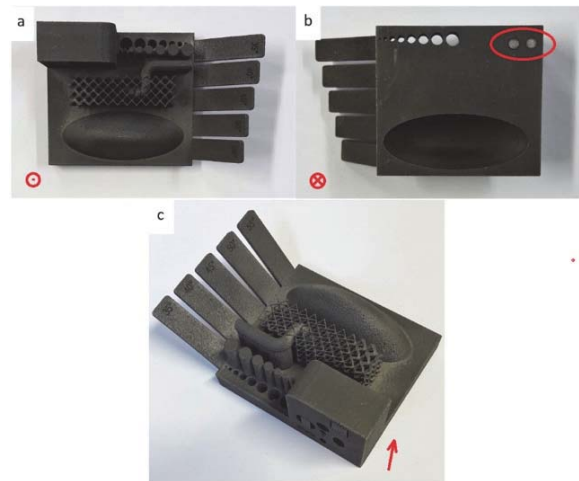
A fénykibocsátó forrás vákuumterét alacsony nyomású argonnal kell feltölteni. Az üreges anód és a katód (vagyis a minta) közötti egyenfeszültség az argon atomokat ionizálja plazmát létrehozva. Az argon kationok ekkor a minta negatív felülete felé gyorsulnak, és kiütnek néhány atomot a vizsgálandó felületből. Ezek a részecskék a plazmába kerülve nagyenergiájú elektronokkal ütköznek. Az ütközések során az atomok egy magasabb, gerjesztett energiaszintre jutnak, amelyről alapállapotba visszaesve karakterisztikus hullámhosszú fényt bocsátanak ki (8. ábra). A spektrométer a fényt a spektrális komponenseire bontja, amelyek az érzékelő rendszerből megfelelő frekvenciánként és intenzitásként szolgáltatja az információt az adatok feldolgozásához. Az egyes hullámhosszokon érzékelhető intenzitás arányos a megfelelő, a plazmában gerjesztett elemek mennyiségi előfordulásával, amelyet az etalonokkal elvégzett kalibráláskor beállított erősítési szintek segítenek hitelesen értékelhetővé tenni.



8. ábra. Porlasztó folyamat a fénykibocsátó forráson belül. Sárga/piros gömbök: minta atomjai, kék gömbök: argon atomok vagy kationok [13]

5.2 Vizsgálati eredmények

A berendezés segítségével egy lézeres olvasztással kialakított tesztadarabot vizsgáltunk, ellenőrizve annak a tervezett összetételét, valamint a felületi réteg mélységi elemzését is lefolytattuk a darabon. Egy ilyen vizsgálat eredménye látható a 10. ábra grafikonján és a 2. táblázatban, ahol a különböző, összetevők színes jelölésű felépítő anyagainak mennyisége (tömeg%-ban) látható a mélység függvényében, az áttekinthetőség érdekében anyagonként eltérő erősítéssel 1-10-100-1000-szeres nagyításban. A vizsgálati minta egy Ti-6Al-4V porból lézeres olvasztással (SLM) készült, melynek képeit és a vizsgálat helyét mutatja a 9. ábra. A mintadarab szabad levegőn volt tárolva hosszabb ideig (>> 72 óra) a vizsgálat előtt.



9. ábra. A vizsgálati darab, a) felülnézetben, b) alulnézetben a vizsgálati helyekkel kiemelve, c) axonometrikus nézetben. Az építés z irányja jelölve minden ábrán

Az összetétel változása (10. ábra) a diagramok mélységi eltérései alapján jól láthatóan 4-5 μm -es mélységtől (lásd: a 2. táblázat első oszlopa) megszűnik, ekkor áll be az összetevők egyensúlyi aránya az alkotók között. Megfigyelhető, hogy a legfelső rétegben (0-4 μm) oxigén és nitrogén nagyobb mértékben volt jelen, mint azt az elméleti összetétel megengedte volna, ez a darab vizsgálatot megelőző tárolási módjának valószínűsíthető következménye.

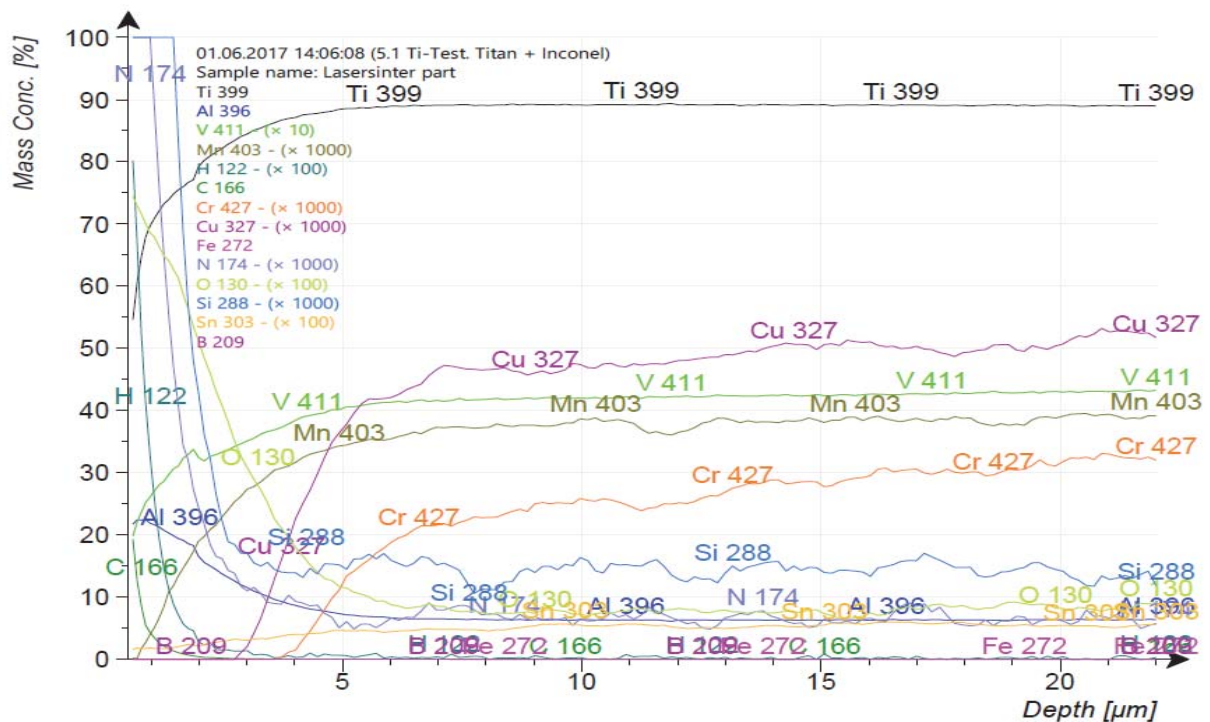
A szerkezeti összetétel változása is szembevetendő ebben a tartományban, melyről pontos adatot a táblázatban olvashatunk 2,6119 μm -nél. A Ti mennyisége ugyanis majdnem 20%-kal alacsonyabb az egyensúlyi szinthez ($\approx 90\%$) képest, míg alumíniumból 19,263% található 5,5-6,5% helyett, vanádiumból pedig kevesebb, 2,849% a 3,5-4,5% helyett. Az alumínium és titán ilyesfajta aránya nem egyensúlyi szövetszerkezetre enged következtetni, melynek több oka lehet, például az építés során keletkező nagy hőelvonás. Ezeket a hatásokat későbbi, célzott vizsgálatokkal tovább kell kutatni legfőképp azért, mert az alumínium csontszövetbe jutása késlelteti, csökkenti vagy megakadályozza a csontosodást, a kalcium-foszfát kiválását. Az

alumínium sók továbbá chondrogenesis-t (porcdifferenciáció) és osteogenesis-t (csonttörékenység vagy üvegszont) okozhatnak az élő szervezetben [14]. A nem egyensúlyi arány valószínűsíti, hogy az alumínium jelentős része nincs lekötve vegyület formában, így protézisként ezzel a felszíni réteggel érintkezve a szervezet könnyedén kioldhatja azt.

Alsóbb rétegekben (5 μm -nél mélyebben) azonban megfigyelhető, hogy minden anyag mennyisége beáll egy állandó szintre. Összevetve az EOS ugyanezen anyagra vonatkozó minősített összetételével megállapítható, hogy 9 μm -tól egyik összetevő mennyisége sem esik kívül a gyártói ajánláshoz képest.

2. Táblázat. Az anyagösszetételek változása megadott mélységekben

mélység, μm	Ti %	Al %	V %	C %	H %	N %	O %
2,6119	71,746	19,263	2,849	4,956	0,231	0,072	0,637
4,7782	85,942	9,972	3,692	0,064	0,008	0,01	0,216
6,9616	88,764	6,85	4,105	0,023	0,005	0,006	0,091
9,1781	89,15	6,404	4,179	0,018	0,003	0,007	0,075



10. ábra. Az anyag összetevők GDOES vizsgálati eredménye 20 μm mélységig [13]

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A felépítő additív gyártással fémporból lézersugaras olvasztással előállított testreszabott protézisek minősége sok tényezőtől függ. Valamennyi befolyásoló tényező pontos beállítása és a gyártási és ellenőrzési folyamatokban előírt értékek biztosítása lehet a garanciája annak, hogy az implantátumok hozzájáruljanak a gyógyítandó páciensek jobb életminőségének elősegítéséhez.

Ahhoz, hogy minden szempontból megfelelő minőségű (csonthoz hasonló tömegű, egyenmerevségű, pontos összetételű, a csontbenövést segítő) implantátumokat készíthessünk, további kutatások, vizsgálatok, minősítések szükségesek a folyamat valamennyi területén (tervezés, gyártás, tárolás, minősítés), hogy a komplex feladatot testreszabottan és minősítetten tudjuk megoldani.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

A kidolgozók köszönik a támogatást.

8. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Sz. Herczeg, J. Takács: Influence of scanning speed on the mechanical and structural properties of laser sintered prototypes, *Periodica Polytechnica Transport Engineering*, Budapest. 2004 32/1-2, pp.: 83-90, HU ISSN 0303-7800
- [2] KESZTE R: Korszerű járműgyártás technológiák OMFB TEP tanulmány, Budapest, 2000
- [3] Bankoff, A. D. P. (2012). Biomechanical characteristics of the bone. INTECH Open Access Publisher.
- [5] Bartolo, P., Kruth, J. P., Silva, J., Levy, G., Malshe, A., Rajurkar, K., ... & Leu, M. (2012). Biomedical production of implants by additive electro-chemical and physical processes. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 61(2), 635-655.
- [6] Bartolo, P. J., Chua, C. K., Almeida, H. A., Chou, S. M., & Lim, A. S. C. (2009). Biomanufacturing for tissue engineering: present and future trends. *Virtual and Physical Prototyping*, 4(4), 203-216.
- [7] Liu, C. Z., & Czernuszka, J. T. (2007). Development of biodegradable scaffolds for tissue engineering: a perspective on emerging technology. *Materials science and technology*, 23(4), 379-391.
- [8] Sealy, M. P., & Guo, Y. B. (2011). Fabrication and characterization of surface texture for bone ingrowth by sequential laser peening biodegradable orthopedic magnesium-calcium implants. *Journal of Medical Devices*, 5(1), 011003.
- [9] Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ramirez, D. A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K. N., & Wicker, R. B. (2012). Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 1-14.
- [10] Dai, K., & Shaw, L. (2005). Finite element analysis of the effect of volume shrinkage during laser densification. *Acta materialia*, 53(18), 4743-4754.
- [11] Vandenbroucke, B., & Kruth, J. P. (2007). Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*, 13(4), 196-203.
- [12] Kruth, J. P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., & Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid prototyping journal*, 11(1), 26-36.
- [13] Spektruma Analytik GmbH. Fabrikzeile 21. 95028 Hof, Deutschland
- [14] Ellis, H. A., McCarthy, J. H., & Herrington, J. (1979). Bone aluminium in haemodialysed patients and in rats injected with aluminium chloride: relationship to impaired bone mineralisation. *Journal of clinical pathology*, 32(8), 832-844.

EGYÉNRE SZABOTT HUMAN IMPLANTÁTUMOK 3D-S MODELLJÉNEK KIALAKÍTÁSI MEGFONTOLÁSAI AZ ADDITÍV GYÁRTÁSHOZ

TAILOR-MADE 3D MODEL DESIGN OF HUMAN IMPLANTS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES

Varga Laura Georgina, Dr. Takács János BME KJK Gépjárműtechnológia Tanszék

ÖSSZEFOGLALÁS

A publikáció az egyénre szabott implantátumok modelljének kialakításával foglalkozik. Bemutatásra kerül az, hogyan állítható elő egy implantátum (csont modell) orvosi diagnosztikai eszközök (pl.: CT, MRI) segítségével készített digitális állományok alapján. A geometriai megfelelés mellett, figyelembe kell venni a biokompatibilitási szempontokat, illetve az emberi csont tulajdonságait, amelyeknek minél jobban meg kell közelíteniük a csontok mechanikai egyenmerevségét. A modellek létrehozásánál középpontba kerülnek a geometriai felépítés lehetőségei, a tömör 3D testtől az üreges, az élő csont benövését segítő szerkezetek kialakításáig. Meghatározásra kerülnek az egyes modellek létrehozásának lépései, valamint az egyes munkafázisok közötti átmenetek, amelyek szükségesek az additív gyártás bemeneteként.

ABSTRACT

The article deals with the development of a model of individualized implants. It is presented how to produce an implant (bone model) based on digital medical informations (CT, MRI). The biocompatibility criteria and human bone properties were taken into consideration during the studies. When creating models, the geometric design possibilities are focused, from the solid 3D body to the creation of hollow, bone-forming structures. The steps for creating models as well as the transitions between each work phase that are needed as input for additive production are presented.

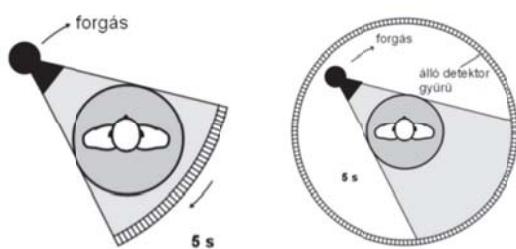
1. BEVEZETÉS

Az új anyagok, technológiai eljárások az egyedi, testreszabott kialakítás körülményei között is képesek a magasfokú és minőségbiztosított automatizált gyártással az implantátumok előállítására. Az egyénre szabott implantátumgyártás már eljutott arra a szintre, hogy az „egészségiparban” is számos esetben alkalmazhatóvá vált a térbeli additív gyártás. Az egyedi implantátumok előállítása megfelelően megválasztott anyagokból (pl.: fémporokból), lézersugaras eljárásokkal valósulhat meg. Ezek az eljárások rétegről-rétegre építik fel a megtervezett implantátumot. Két módszer sorolható ide, a szelektív lézeres szinterezés (SLS), valamint a szelektív lézeres olvasztás (SLM). További fontos követelmény, hogy az egyénre szabott implantátumok biokompatibilis anyagból készüljenek el annak érdekében, hogy megfelelően be tudjanak épülni, és együtt tudjanak működni az élő emberi szervezettel. Ezek az anyagok, legelterjedtebben a 316L illetve a Ti-6Al-4V. A gyártás tényleges megvalósulása előtt számos vizsgálat, orvosi-mérnök konzultáció, illetve tervezési lépés elvégzése szükséges. [1]

2. A MODELLEZÉS MEGELŐZŐ LÉPÉSEI

Alapvető kiindulási momentum az implantátum tárgyát képező csont vizsgálata MRI-vel, vagy CT-vel. Az MRI mágneses rezonancián alapuló eljárás, míg a CT röntgenfelvételek elkészítését valósítja meg. Mindkét eljárás felhasználható, azonban modellkészítési feladatoknál a CT-felvételeket használják elterjedten. Az elkészült képek ezután digitális feldolgozásra kerülnek,

középpontban áll a felvételek szűrkeségi értékeinek elemzése. Ezek szemléletesen jellemzik a csontok sűrűségét, amely ez életkor, a nem, illetve különböző betegségek függvénye. A sűrűségi érték fontos információ, amelyet a modellezés során figyelembe kell venni, hiszen olyan implantátum gyártása a cél, amely a valódi, pótolandó csont tulajdonságait minél inkább megközelíti. Mindezt követően megkezdődhet a számítógépes modellezés. Először egy kezdetleges 3D modell jön létre, majd ezen kell a szükséges változtatásokat megvalósítani.[2]



1. ábra: A CT-berendezés működése [2]

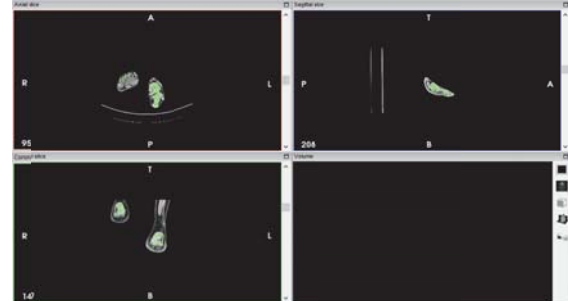
3. A CT-FELVÉTELEK ÁTALAKÍTÁSA

A CT-felvételek DICOM formátumban készülnek el. A DICOM fájltypus használata lehetővé teszi, hogy minden képszelet egy fájlban szerepeljen, megkönnyítve a feldolgozást és a továbbítást. Emellett a fájlok szöveges információt is tartalmaznak a páciensre vonatkozóan. Meg kell azonban említeni, hogy csak speciális szoftverek képesek ezen fájlok megnyitására, kezelésére és átalakítására. A végső cél az, hogy a gyártó berendezés számára felhasználható STL formátumú fájlok készüljenek el. Szem előtt tartandó elvárás volt, hogy bárki számára szabadon hozzáférhető szoftverek kerüljenek kiválasztásra, így a CT-felvételek InVesalius-szal lettek feldolgozva. Alapvetően több lépésre bontható a felvételek feldolgozása: az adatok beimportálása után ki kell jelölni a felvételeken a vizsgálatok tárgyát képező felületeket, majd a 3D modellfelület generálását követően meghatározott fájlformátumban kell kiexportálni a modellt. Ezután valósítható meg a csontmodellek különböző konstrukcióinak kialakítása. Két példán keresztül mutatjuk be a folyamatot, egy nagylábuji középcsontnak, valamint egy kézközépcsontnak a kialakítása során.[3]

4. A NAGYLÁBUJJI KÖZÉPCSONT MODELLEZÉSE

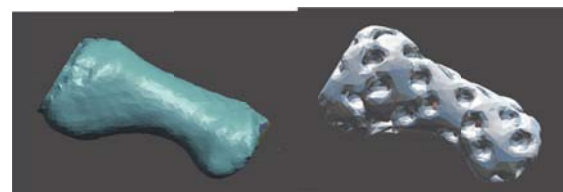
Első lépésként CT felvételek készültek a

lábfejről. Ezután az InVesalius segítségével létrejött egy kiindulási modell a teljes lábfejről.



2. ábra: CT-felvételek az InVesaliusban

A további átalakítások a szabadon elérhető Autodesk Meshmixer felhasználásával valósultak meg. Először a lábfejből a nagylábuji középcsont „kivágását” kellett megvalósítani. Ez síkokkal történő vágást (körbehatárolást) jelentett. A művelet elvégzése után létrejött a kiindulási modellt jelentő tömör csont. Ezt célszerűen át kell alakítani annak érdekében, hogy minél inkább megközelíthetőek legyenek a valódi csont tulajdonságai. A cél egy könnyebb, üreges, de megfelelő teherbírási modell létrehozása. A tömör konstrukció mellett több modellváltozat készült. Az első típusnak a külső felületén és a belső részén is üregek helyezkednek el. Ez a struktúra elősegíti a csont benövését, így az implantátum beépülését a szervezetbe. A gyártás során a nem megolvasztott felesleges por a kialakított üregeken keresztül eltávolíthatóvá válik. A modell létrehozásakor kialakuló síkok találkozásánál következésképpen utólagos javításra lehet szükség, pl.: a nem zárt szélű élek összekapcsolására.

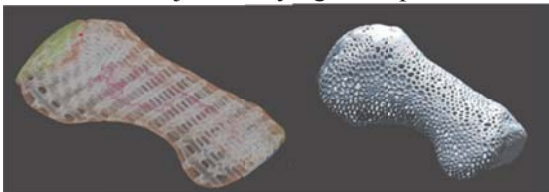


3. ábra: Tömör és üregekkel rendelkező modellek

A második típus egy tömör külső felületű, belül rácsos szerkezetű modell. Ezt egy

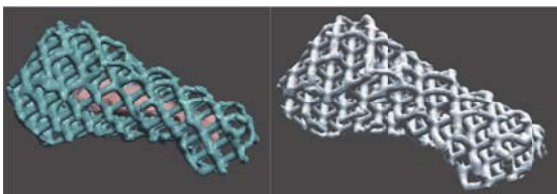
vékony, meghatározott vastagságú tömör külső felület, és egy belső szabályos rácsszerkezet jellemzi. Megoldandó probléma, hogy a zárt külső felületek miatt nem lehet a gyártáskor nem összeolvasztott port eltávolítani a modell belsejéből, ami ebben a formában nem kerülhet be az emberi szervezetbe.

További változatként egy kívül rácisos szerkezetű modell lett kialakítva. A vékony külső felület rácisos kialakítással készült. A kialakított falvastagság változtatható egy megadott tartományon belül. A modell teherbíró képességét belső merevítésekkel kell megerősíteni annak érdekében, hogy alkalmassá váljon a tényleges beépítésre.



4. ábra: Tömör külső felületű, belül rácisos modell és kívül rácisos szerkezetű modell

A következő két modell hasonló felépítéssel rendelkezett. Mindkét esetben teljes rácsszerkezet került kialakításra, az egyik belső merevítéssel, a másik belső merevítés nélkül készült el. Az említett két csontmodell elősegíti az implantátum megfelelő kompatibilitását a szervezethez, hiszen a csontszövetnek lehetősége van körbenőni a beépített csontimplantátumot. Fontos, hogy az implantátumnak el kell viselnie a csontra ható erőket. Ennek megállapításához véges elemes szimulációt kell elvégezni az elkészült modellen. Azt, hogy szükséges-e a belső merevítés alkalmazása, szintén véges elemes vizsgálatok segítségével lehet megállapítani. Mindkét esetben figyelni kell arra, hogy a nem kapcsolódó elemek miatt szükséges lehet az utólagos hibajavítás.



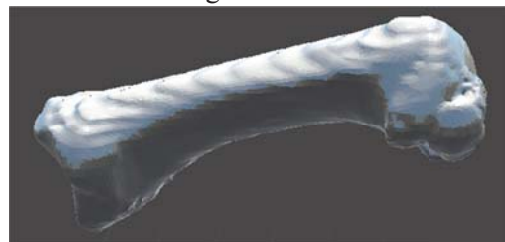
5. ábra: Teljes rácisos szerkezetű modell belső merevítéssel és belső merevítés nélkül

5. A KÉZKÖZÉPCSONT MODELLEZÉSE

A lábfej csontjának modellezésén túl egy kéz középcsontjának a modellezését is kidolgoztuk, mert ennek mechanikai igénybevétele összetett. A kézközépcsont nagyon fontos szerepet játszik a kézfej, illetve az ujjak mozgásában. Amennyiben sérülést szenved a csont, és nem tud megfelelően regenerálódni, illetve nem lehetséges a pótlása, az a sérült kézfej egyes motorikus funkcióinak kiesését jelentheti. Előzőek alapján látható a modellezés, valamint a modell alapján történő egyénre szabott implantátum gyártásának szükségessége.

Ebben az esetben is szükséges egy kézfejről készült röntgenkép. A modellek kialakításához elvégzendő első lépés ebben az esetben is az InVesaliusban történő kiindulási modell létrehozását jelentette. Ezt követően három további konstrukció modellezése készült el.

A teljesen tömör modell ebben az esetben is a kiindulást adta, a tényleges beépítéshez szükség van az átalakításra, üreges, a valós csont mechanikai tulajdonságait jobban közelítő modell megalkotására.



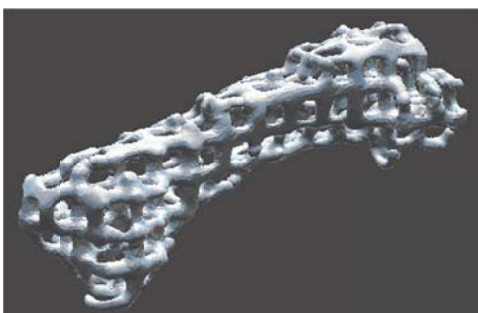
6. ábra: Tömör kézközépcsont modell

A második változat ismét egy belül üreges modell volt, amely felületén üregek és bemélyedések lettek kialakítva. Ezek elősegítik a csontszövet benövését, emellett a gyártáskor keletkező felesleges por is eltávolíthatóvá válik az üregeken keresztül. Amennyiben az üregek szélei nem záródnak, utólagos hibajavítást kell kilátásba helyezni. Emellett minden esetben számolni kell a modellen kezelendő felületi eltérésekkel, hibákkal is.

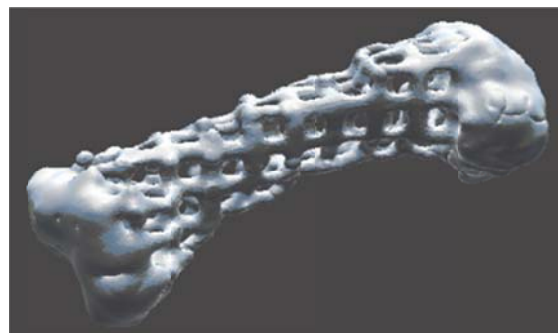


7. ábra: Belül üreges modell bemélyedésekkel a felületén

A következő két létrehozott modell típus teljesen hálós felépítéssel rendelkezik, amely elősegíti a csont implantátum megfelelő kompatibilitását beépüléskor. A csontszövetnek lehetősége van körbenőni a beépített implantátumot. Előfordulhat az a helyzet is, hogy nem a teljes csontot kell pótolni, hanem annak csak egy részét. Ennek következtében kapcsolódási felületet kell biztosítani a meglévő csontfelületekhez illetve ízületekhez. Az orvosi igények szerint létrehozható akár tömör, akár üreges csatlakozó felület is.



8. ábra: Teljes rácsos szerkezetű kézközépcsont modell



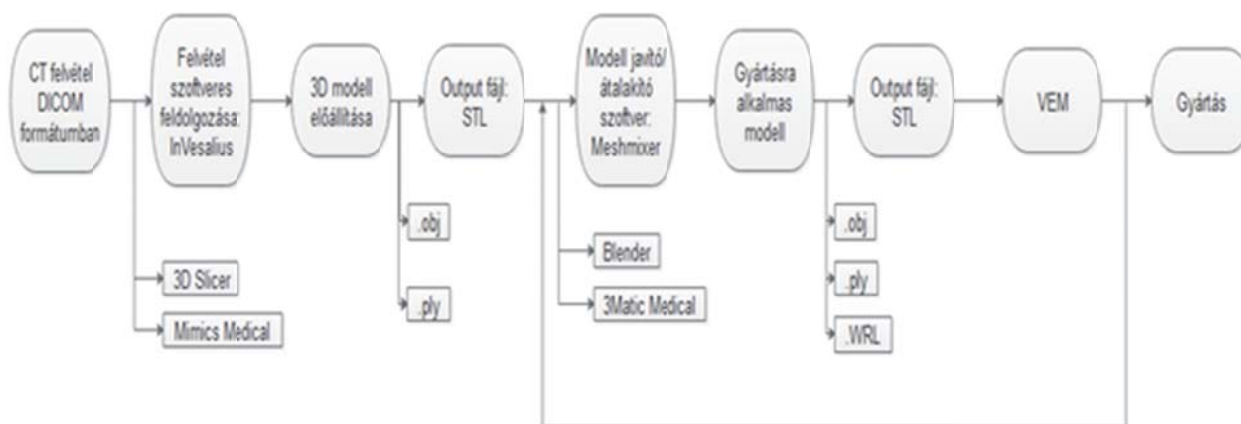
9. ábra: Teljes rácsos szerkezetű modell a végein tömör kialakítással

Amennyiben létrejöttek a lehetséges modell változatok, minden esetben szükség van a VEM vizsgálatok elvégzésére. [4]

Ezek alapján lehet legjobban összehasonlítani a konstrukciókat teherviselés szempontjából. Véglegesen ezen eredmények alapján lehet arról dönteni, hogy mely modellek közelítik meg leginkább a valós csont tulajdonságait, tehát melyik változat alkalmas a legyártásra implantátumként.

6. RENDSZERTERV

Ahhoz, hogy a tervezési, modellezési és gyártási folyamat könnyen átlátható legyen, elengedhetetlen egy rendszerterv létrehozása, amely tartalmazza a főbb lépéseket (10. ábra).



10. ábra: A kialakított rendszerterv a konzultációkkal, visszacsatolásokkal



11. ábra: Az első legyártott minták fényképei

A rendszerterv lépései:

- CT-felvételek készítése DICOM formátumban;
- A felvételek szoftveres feldolgozása InVesalius segítségével;
- Kiindulási 3D modell előállítás STL fájlformátumban;
- Modell átalakítása és javítása, különböző konstrukciók létrehozása;
- Gyártásra alkalmas modell kialakítása STL formátumban;
- Véges elemes vizsgálatok elvégzése;
- Implantátum gyártása; porágyban elhelyezhető implantátumok és vizsgálati mintadarabok munkatérbe tervezése;
- Mintadarabok vizsgálata, tesztelése;
- Az esetleges visszacsatolásoknak megfelelő finomítás.

Abban az esetben, ha a véges elemes vizsgálatok alapján nem megfelelő a létrehozott modell, nem közelíti meg az elvártnak megfelelően a valós csont tulajdonságait, szükség van visszalépni a modell átalakításához és javításához. Ezt mindaddig el kell végezni, amíg elő nem áll a lehetséges ideális tulajdonságokkal rendelkező beépítésre alkalmas egyénre szabott implantátum.

A munka során a modellekből legyártásra kerültek az első minták Ti-6Al-4V anyagból, amelyeket a 11. ábra szemléltet.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

A kidolgozók köszönik a támogatást.

8. IRODALOM

[1] Bose, S., Ke, D., Sahasrabudhe, H., Bandyopadhyay, A., Additive Manufacturing of Biomaterials, *Progress in Materials Science* (2017), doi:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.08.003>

[2] Bogner P.: Az orvosi képkalkotás fizikája az Orvosi Laboratóriumi és Képkalkotó Diagnosztikai Analitikus alapszak hallgatói részére (2014)

ISBN 978 963 226 450 9

[3] DICOM formátum jellemzői:

<https://www.lifewire.com/dicom-file-2620657>

[4] Dr. Molnár László: Véges elem módszer gyakorlata A Foglalkoztatáspolitikai és Munkaügyi Minisztérium:

Humán erőforrás-fejlesztési Operatív Program „A felsőoktatás szerkezeti és tartalmi fejlesztése” HEFOP-3.3.1-P.-2004-06-0039/1.0

CONTENTS

1. Luis M.C. Simões, Jármai Károly, Virág Zoltán:
RELIABILITY-BASED COST DESIGN OF LONGITUDINALLY STIFFENED WELDED STEEL PLATES 5
The aim of this work is the reliability-based optimization of a stiffened plate subjected to in-plane or combined in-plane and transverse loading. A level II reliability method (FORM) is employed. The overall structural reliability is obtained by using Ditlevsen method of conditional bounding. The branch and bound strategy is employed to enumerate ε -optimum costs, which are solutions within a specified tolerance of the optimum.
2. Dr. Jármai Károly:
COST CALCULATION OF THIN-WALLED WELDED STRUCTURES USING DIFFERENT FABRICATION TECHNOLOGIES 13
The cost calculation of welded steel structures is shown. This calculation is established on the fabrication time of the given technology. Considering several welding and cutting technologies, painting and surface preparation, one can calculate the optimum sizes, dimensions of the structure.
3. Spisák Bernadett, Beleznai Róbert:
INJECTION MOLDING SIMULATION OF A COMPOSITE OIL PAN 21
For polymer-based composites, the most common production method is the injection molding. This method was chosen for the manufacturing process of the oil sump and injection molding simulation was executed. The results obtained from the researches are presented.
4. Petrik Máté, Szepesi Gábor, Jármai Károly:
COMPARISON OF ANALYTICAL CALCULATION, NUMERICAL SIMULATION AND MEASUREMENTS OF TUBE SIDE HEAT TRANSFER OF A SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGER 25
A model shell-and-tube heat exchanger with horizontal baffles was numerically investigated compared to the measured values using the commercial software SC-Tetra V11
5. Dr. Jármai Károly:
PROFESSIONAL LIFE OF JÓZSEF FARKAS DEDICATED TO STRUCTURAL OPTIMIZATION 29
This article deals with the professional activity and life of Prof. József Farkas, who started his carrier at the University of Miskolc in 1950. His main research fields were structural optimization, residual stresses and deformations of welded structures and structural stability.
6. Dr. Kota László, Dr. Jármai Károly:
APPLICATION OF MULTILEVEL OPTIMIZATION ALGORITHM 32
In this paper we will show and evaluate some multi-level optimization methods tested on several test functions, comparing the convergence and computational needs.
7. Hazim Nasir Ghafil, Dr. Jármai Károly:
RESEARCH AND APPLICATION OF INDUSTRIAL ROBOTS AND MANIPULATORS AT CAR- AND VEHICLE ENGINEERING, A REVIEW 36
This work explores the use of robot manipulators and their various applications in the automotive and vehicle industries, as well as the relationship between applications and optimized robot manipulators, and robotic statistics around the world
8. Nagy Szilárd, Dr. Jármai Károly:
BASIC, HIBRID AND MULTILEVEL EVOLUTIONARY ALGORITHMS 44
The methods are well used to solve nonlinear, multi-dimensional engineering problems, where the usage of gradient based methods is difficult, or can't be used. In last few years, research of these methods is get great emphasis. In this paper three basic algorithm - namely random search, firefly algorithm and differential evolution, hybrid and multi-level methods and their combinations are investigated.
9. Fehér Márk, Dr. Takács János:
MATERIALS AND MEASUREMENTS FOR ADDITIVE MANUFACTURED CUSTOMIZED HUMAN IMPLANTS 52
Designing and manufacturing medical implants are complex tasks. To determine the exact composition of their materials is important, and by the use of GDOES we can get reliable and quick results about that. This presentation demonstrates the results of a GDOES measurement taking the implants' quality requirements into account.
10. Varga Laura Georgina, Dr. Takács János:
TAILOR-MADE 3D MODEL DESIGN OF HUMAN IMPLANTS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES 59
The article deals with the development of a model of individualized implants. It is presented how to produce an implant (bone model) based on digital medical informations (CT, MRI). The biocompatibility criteria and human bone properties were taken into consideration during the studies. When creating models, the geometric design possibilities are focused, from the solid 3D body to the creation of hollow, bone-forming structures.

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. Jármai Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

Deputy

Dr. Barkóczi István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bercesy Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Kármán Antal

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálincás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Szűcs Edit

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

Dr. Zobory István

DEAR READER,

Research at the University of Miskolc at the 4th Center for Excellence is under the heading *Innovative Vehicle Engineering, Power Engineering and Mechanical Engineering and Technologies*. The Center's objective is to develop research potential through research that innovates modelling, design and technological processes, in line with the European Union's drive to foster innovation, and the application and development of the most efficient environmental technologies. The Center for Excellence wants to improve the results achieved with new ones. For the 2014-2020 period, many topics were developed for the emerging GINOP and EFOP applications. Hopefully these will be incorporated into the forthcoming call for proposals.

In 2016 at the University of Miskolc, a car engineer training course started and created new challenges. The new PhD students who came to Stipendium Hungaricum to us also gave impetus to certain areas. We intend to introduce these new directions and results with this issue.

Most of the articles are the result of the 6th Scientific Group of 4th KK, the topic of which is the Optimum Design of the Engineering Support and Frame Structures. All articles are linked to the Department of Chemical Machinery at the Institute of Energy and Chemical Machinery.

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

The last two papers belong to the colleagues from the Budapest University of Technology and Economics.

Prof. Dr. Károly Jármai
leader of the Center of Excellence

Managing Editor: Vesza József. Editor's address: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Phone/fax: (+36-46) 379-530, (+36-30) 9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Postal address: 1371, Bp, Pf. 433

Phone: 202-0656, Fax: 202-0252, E-mail: mail@gteportal.eu, Web: www.gteportal.eu

Web: <http://www.gepujsag.hu> * Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Publisher: Dr. Igaz Jenő, Managing Director

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Telefon: 06-46/379-530 • e-mail: gazdasz@chello.hu

Distributed to subscribers by Magyar Posta Zrt, Postal address: 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered at any Hungarian post office, from postmen, from the link: www.posta.hu WEBSHOP

(<https://eshop.posta.hu/storefront/>), via e-mail: hirlapelofizetes@posta.hu, by phone: 06-1-767-8262, or mail to: MP Zrt. 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered from overseas and to overseas at Magyar Posta Zrt. Visit: www.posta.hu WEBSHOP (<https://eshop.posta.hu/storefront/>), mail to: 1900 Budapest, 06-1-767-8262, or hirlapelofizetes@posta.hu

Domestic subscription prices are: HUF 1,260 a single copy and HUF 2,520 a double copy.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

The published articles have been reviewed.

The publication is supported by the National Cultural Fund of Hungary

IPARI TERMÉK- ÉS FORMATERVEZŐ MÉRNÖK HALLGATÓK KIÁLLÍTÁSA A MISKOLCI GALÉRIÁBAN

EXPOSITION OF INDUSTRIAL DESIGN ENGINEERING STUDENTS IN GALLERY OF MISKOLC

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

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

1. BEVEZETÉS

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

2. A KIÁLLÍTÁS ÖTLETE

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

3. A KIÁLLÍTÁS TÉMÁJA

A kiállításon a hallgatói munkák sorában az Integrált terméktervezés I-II-III-IV valamint Szakdolgozat-készítés c. tárgyak keretében született eredmények mellett Tudományos Diákköri dolgozatok és Nemzetközi hallgatói projektek poszterei és makettjei is helyet kaptak. Emellett a régebbi és a legújabb

tanszéki ipari fejlesztések is megjelentek bemutatva a szakot gondozó intézeti háttérrel.



1. ábra. A kiállítás meghívója

4. MEGNYITÓ

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



2. ábra. A megnyitó látogatói

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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



Hidépítő verseny díjátadás



Járműmérnök hallgatók látogatása a kecskeméti Knorr-Bremse gyárban