

Dr. Jármai Károly^{*1}, Nagy Szilárd^{*2}, Dr. Petrik Máté^{*3}

A Miskolci Egyetem kutatási témái hegesztett szerkezetek tervezésében

Research topics at the University of Miskolc in the design of welded structures

^{*}Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, ¹egyetemi tanár, altjar@uni-miskolc.hu, ²doktorandusz, vegynsz@uni-miskolc.hu, ³egyetemi adjunktus, vegypet@uni-miskolc.hu

A Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézetében széles körű kutatások folynak hegesztett szerkezetekre vonatkozólag. Ebben a cikkben két doktoranduszhoz tartozó kutatást ismertetünk. Az első téma egy futódaru hegesztett főtartójának optimalizálása költségre, ahol a statikus feszültség, a lokális horpadási feltételek, a fáradás és a lehajlás kerültek figyelembevételre. Az optimalizálás során a grafikus processzor kártya (GPU) programozásával a párhuzamos számításokkal jelentős növekedés volt elérhető a számítási sebességben. A második téma hegesztett aszimmetrikus I-tartók optimalizálása, ahol különböző anyagú, feszítávú, terhelésű tartók tömegminimumra történő méretezése történt oly módon, hogy a tartó hegesztésből származó kardosodását rugalmas előhajlítással nulláztuk. Mindegyik alkalmazási terület azt mutatja, hogy a szerkezetoptimalizálás segítségével jelentős tömeg- és költségmegtakarítás érhető el.

Kulcsszavak: hegesztett szerkezetek, optimalizálás, fáradás, stabilitás, maradó feszültségek

At the Institute of Energy Engineering and Chemical Machinery of the University of Miskolc, extensive research is carried out on welded and laminated structures. In this article, two PhD students' research projects are presented. The first topic is optimising a welded main girder of an overhead travelling crane in terms of cost, where static stress, local buckling, fatigue, and deflection are considered. Here, by programming the graphics processing unit card (GPU) with parallel computation, a significant increase in computational speed was achieved. The second topic is the optimisation of welded asymmetric I-beams to a minimum weight using different materials, span lengths and loads such that the longitudinal bending distortions of the beam due to welding was zeroed out by pre-bending. All these applications show that significant weight and cost savings can be achieved through structural optimisation.

Keywords: welded structures, optimization, fatigue, stability, residual stresses

1. Bevezetés

A korszerű mérnöki teherviselő szerkezetek fő követelményei a biztonság, gyárthatóság és gazdaságosság. Az innovatív tervezést az jellemzi, hogy olyan szerkezeti variánsokat fejlesztünk ki, amelyek az eddigiekhez képest jobb tulajdonságokkal rendelkeznek, vagyis könnyebbek, biztonságosabbak, gazdaságosabbak. Optimális tervezési rendszerünk biztosítja a biztonságot és gyárthatóságot a tervezési és gyártási feltételek figyelembevételével és a gazdaságosságot a költségfüggvény minimálásával. A költségcsökkentéshez megfelelő költségfüggvény és hatékony matematikai szélsőérték-számító módszer szükséges. Ezért kifejlesztettünk egy aránylag egyszerű költség-számítást hegesztett és rétegezett szerkezetekre és adaptáltunk több matematikai optimalizáló módszert. Jelen cikk ezt a tervezési irányt mutatja két alkalmazási területen.

2. Futódaru hegesztett szekrény keresztmetszetű főtartójának optimalizálása GPU programozással

A meta-heurisztikus és evolúciós módszerek napjaink hatékony eszközei nemlineáris folytonos, vagy korlátos

optimalizálási problémák megoldására. Ezeket az alábbi formában lehet összefoglalni:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{ha } g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, q \\ h_j(x) = 0 \quad j = q + 1, \dots, n \\ x = (x_1, x_2, \dots, x_D) \in F \subseteq S \end{aligned} \quad (1)$$

ahol F a lehetséges megoldások halmaza és S pedig a keresési tér. Az evolúciós algoritmusok felépítése és működése hasonló. Ez azt jelenti, hogy a kezdeti populáció egyedeit módosítják természet inspirálta technikák segítségével, a módosított egyedekkel pedig minden iterációs lépésben kiszámolják a célfüggvényt. Párhuzamosítással csökkenthető a szükséges számítási idő. Az evolúciós algoritmusok különböző módokon párhuzamosíthatók [1]:

- globális modell: legegyszerűbb módszer, csak az elemi műveletek futnak párhuzamosan.
- regionális modell: a teljes populáció azonos méretű kisebb csoportokra kerül felbontásra, és ezeken a populációkon történik párhuzamosan egymástól függetlenül az optimalizáció. Meghatározott időközönként a populációk között a kommunikációt a migráció biztosítja.

- lokális modell: minden egyed egy külön neki dedikált szálon, mikroprocesszoron fut és csak a szomszédjaival kommunikál.

Ma már a GPU-k nem csak a grafikus megjelenítést és az azokhoz szorosan kapcsolódó számítások elvégzését támogatják. Olcsó és hatékony eszközei az általános célú, tudományos számításoknak. Sikeresen kiaknázzák az általuk nyújtott lehetőségeket a topológiai optimalásban [2], szerkezet optimalásban [3]. SIMD (egyazon művelet, több adaton) programozási modell implementálásával egy masszívan párhuzamos környezetet kínálnak. Napjainkban két keretrendszert alkalmaznak ezen kártyák programozására. Az első az OpenCL, ami egy nyílt forráskódú rendszer. A második pedig csak kizárólag az NVIDIA kártyákat támogató CUDA [4]. Mi ezt használjuk.

A futódaru kialakítását és méreteit az 1. ábra mutatja.

Változó: a szelvény négy jellemző mérete: $h, t_w/2, b, t_f$

Célfüggvény (fitness function):

Költség: anyagköltség, hegesztési előkészítés, tényleges hegesztés, hegesztési utókezelés költsége, festési, felület előkészítési költség. Ennél a példánál csak az anyag- és hegesztési költségek kerülnek számításra

$$f(\bar{x}) = K_m + \sum_i K_{wi} + K_p \quad (2)$$

Méretezési feltételek: statikus feszültség, helyi horpadás, fáradás, valamint a lehajlás az Eurocode 3-nak megfelelően [15].

- Az anyagköltség:

$$K_m = \hat{K}_{m1}ht_w + \hat{K}_{m2}bt_f + \hat{K}_{m3}bh \quad (3)$$

- A felső övlemez összefűzési és hegesztési költsége

$$K_{w1} = \hat{K}_{w1,1} \sqrt{\hat{K}_{w1,2}ht_w + \hat{K}_{w1,3}bt_f} + \hat{K}_{w1,4}bh + \hat{K}_{w1,5} \quad (4)$$

- A sín összeállítási hegesztési költségét ipari adatok alapján függvényközelítéssel határozhatjuk meg

$$K_{w11} = \hat{K}_{w11,1}t_w^{1,94} \quad (5)$$

- A diafragmák összeállítási és hegesztési költsége

$$K_{w12} = \hat{K}_{w12,1}bt_w^2 + \hat{K}_{w12,1}ht_w^2 \quad (6)$$

- Az alsó övlemez összefűzési és hegesztési költsége

$$K_{w2} = \hat{K}_{w2,1} \sqrt{\hat{K}_{w2,2}ht_w + \hat{K}_{w2,3}bt_f} + \hat{K}_{w2,4}bh + \hat{K}_{w2,5}$$

- A két gerinc összeállítási és hegesztési költsége 11 db 1500 mm-es lemezből

$$K_{w3} = \hat{K}_{w3,1} \sqrt{ht_w} + \hat{K}_{w3,1}ht_w^{1,94} \quad (8)$$

- A két övlemez lemez összeállítási és hegesztési költsége 11 db 1500 mm-es lemezből

$$K_{w4} = \hat{K}_{w3,1} \sqrt{bt_f} + \hat{K}_{w3,1}bt_f^{1,94} \quad (9)$$

- A hegesztési utókezelés költsége

$$K_t = \hat{K}_{t,1}b \quad (10)$$

- A teljes költség

$$f(\bar{x}) = K_m + K_{w1} + K_{w11} + K_{w12} + K_{w2} + 2K_{w3} + 2K_{w4} + K_t \quad (11)$$

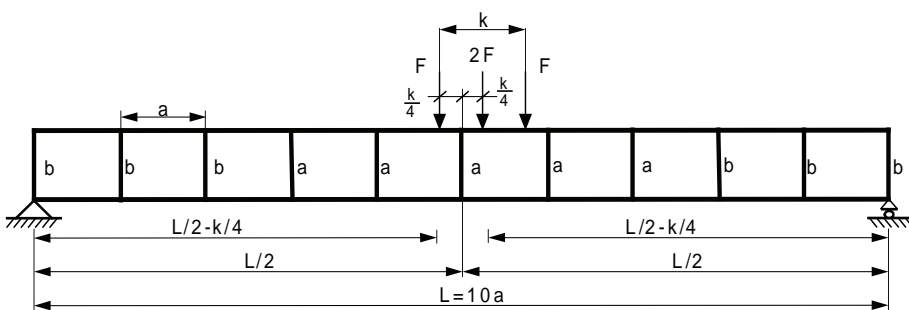
2.1. Célfüggvény párhuzamos számítása módosított párhuzamos redukcióval

Evolúciós algoritmusok alkalmazása során a célfüggvény egy speciális függvény. Ez rangsorolja iterációs lépésenként az egyedeket. A felépítésük algoritmusonként és megoldandó feladatonként különböző lehet. A különbözőség ellenére van egy közös tulajdonságuk, mindegyik egy redukciót hajt végre, ami azt jelenti, hogy a többdimenziós térhez egyetlen számot rendel. Mérnöki problémák esetén ez az esetek többségében egy valós szám.

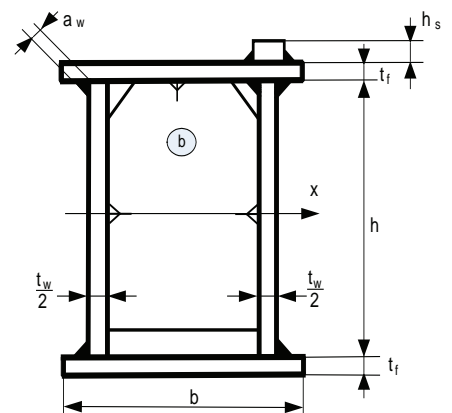
$$\mathcal{F} = \mathcal{F}(f(\bar{x}), g_1(\bar{x}) \cdots g_q(\bar{x}), h_1(\bar{x}) \cdots h_r(\bar{x})) \quad (12)$$

$$\mathcal{F}: S^D \mapsto \mathbb{R}$$

ahol S^D a D dimenziójú keresési tér.



1. ábra: Futódaru főtartó kialakítása, méretei



A párhuzamos redukció egy jól ismert eleme a párhuzamos technikák eszköztárának.

Az eredeti célfüggvény felbontható egyszerűbb alfüggvények variációjára

$$\mathcal{F}(x) = \mathcal{F}_1(\bar{x}_{v1}) \otimes_1 \mathcal{F}_2(\bar{x}_{v2}) \otimes_2 \cdots \otimes_{n-1} \mathcal{F}(\bar{x}_{vn}) \quad (13)$$

ahol az $\bar{x}_{v1}, \bar{x}_{v2} \cdots \bar{x}_{vn}$ vektorok elemei az eredeti \bar{x} vektor elemeinek a variációja. Az így kapott alfüggvények további egyszerűbb függvényre felbonthatók. Ezt a felbontást addig kell ismételni míg az eredeti függvény olyan egyszerű függvényekből nem áll, amire igaz, hogy két változótól és egy α konstanstól függ és kiszámíthatók egy lépésben.

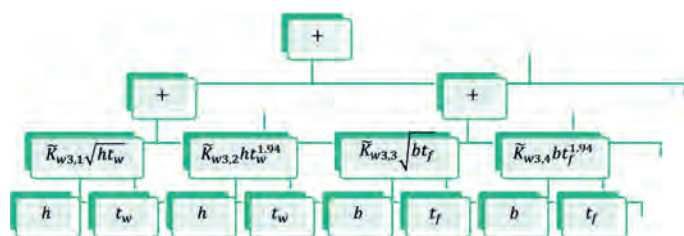
$$\mathcal{F} = \mathcal{F}(x_i, x_j, \alpha) \quad (14)$$

ahol i, j független indexek.

Az alapvető matematikai műveleteket, mint az összeadást, kivonást, szorzást, osztást stb. programozás-technikailag függvényként szükséges kezelni. Az alfüggvények hierarchiája ábrázolható egy fa struktúrában, mint azt a 2. ábra szemlélteti. A fa levelei – a bemeneti változók – az eredeti \bar{x} vektor elemeinek a variációja. A csomópontok tartalmazzák a felbontásból származó „egyszerű” függvényeket. Az alsóbb szintek bemenő adatai pedig minden esetben az öt megelőző szinten elhelyezkedő függvények eredményei. Látható, hogy egy adott szinten található függvények nem függenek egymástól, ezért kiszámíthatók párhuzamosan.

A számítás párhuzamossá tétele a futódaru főtartónál a szerelési és hegesztési költség-részlet vonatkozásában kerül bemutatásra (2. ábra)

$$K_w = \tilde{K}_{w3,1} \sqrt{ht_w} + \tilde{K}_{w3,2} ht_w^{1,94} + \tilde{K}_{w3,3} \sqrt{bt_f} + \tilde{K}_{w3,4} bt_f^{1,94} \quad (15)$$

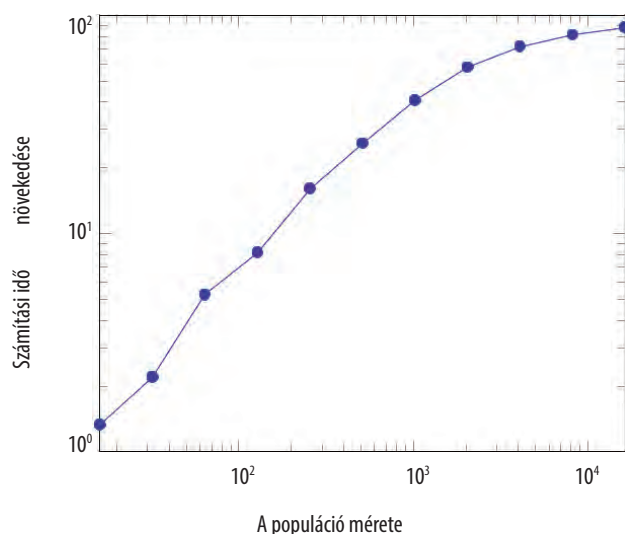


2. ábra: Futódaru főtartó költségszámítása, egy elemének párhuzamosítása

A 3. ábra mutatja a futódaru főtartó optimalálása során a futásidő növekedését az optimaláló algoritmus populációszámának függvényében négy változó esetén. Látható, hogy közel százszorosra növekedett a sebesség. A populációszám nagyságával arányos a számítási sebesség növekedése (normál futásidő/GPU futásidő) (3. ábra).

A vizsgálatok azt mutatják, hogy szekrény keresztmetszetű futódaru főtartó optimalálása elvégezhető költségminimumra, a statikus feszültségi, helyi horpadási, fátörési

és lehajlási feltételek figyelembevételével. GPU programozással ez a számítás jelentősen meggyorsítható.



3. ábra: Futásidő növekedése a populációszám függvényében négy változó esetén

3. Aszimmetrikus hegesztett I-szelvény optimalálása minimális tömegré és vetemedésre

A hegesztési feszültségeket és alakváltozásokat a varratok gátolt zsugorodása okozza. Ezek károsan befolyásolják a szerkezet működését, mert a húzó feszültségek növelik a fátörési repedések terjedési sebességét, a nyomófeszültségek pedig csökkentik a nyomott rudak kihajlási, valamint a lemezek és héjak horpadási szilárdságát. A vetemedések méret-pontatlan szerkezeti elemeket, sejtet eredményezhetnek. Ezért szükséges, hogy számítással előre megbecsüljük nagyságrendjüket és előzetes vagy utólagos csökkentési eljárásokat alkalmazzunk.

Okerblom [5], Vinokurov [6], Masubuchi [7] és Kuzminov [8] könyveikben különböző számítási eljárásokat dolgoztak ki. Okerblom az egyenes rudak hosszvarrataiból származó zsugorodások és vetemedések számítására aránylag egyszerű képleteket adott, amelyek jól használhatók előzetes becslésekre, ezért ezeket adaptáltuk (Farkas, Jármái [9, 10]).

Az AT hőimpulzusra Okerblom a következő közelítő képletet javasolta:

$$A_T = \frac{0.4840\alpha_o Q_T}{c_o \rho t} \ln 2 = \frac{0.3355\alpha_o Q_T}{c_o \rho t}, \quad (16)$$

ahol $Q_T = \eta_o \frac{UI}{v_w} = q_o A_w$ a hőbevitel, U a feszültség, I az áramerősség, v_w a hegesztési sebesség, c_o a fajhő, η_o a hegesztés hatásfoka, q_o az egységnyi varrat-térfogatra eső fajlagos hő (J/mm^3), A_w a varrat keresztmetszeti területe.

Látható, hogy ez a képlet tartalmazza a hegesztési paramétereket és az alapanyag jellemzőit, ezért igen jól alkalmazható acélokon kívül más anyagokra, pl. alumínium-ötvözetekre is.

Hegesztett acélszerkezetekre

$$\alpha_o = 12 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}],$$

$$c_o \rho = 4.77 \times 10^{-3} [\text{J}/\text{mm}^3/^\circ\text{C}], \text{ így}$$

$$A_T t [\text{mm}^2] = 0.844 \times 10^{-3} Q_T \left[\frac{\text{J}}{\text{mm}} \right].$$

A rúd-keresztmetszet súlyponti szálának fajlagos zsugorodására és a vetemedési görbületre vonatkozó alapvető Okerblom-képletek

$$\varepsilon_G = \frac{A_T t}{A} = -0.844 \times 10^{-3} \frac{Q_T}{A}, \quad (17)$$

$$C = \frac{A_T t y_T}{I_x} = -0.844 \times 10^{-3} \frac{Q_T y_T}{I_x}. \quad (18)$$

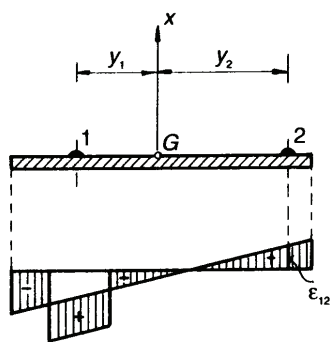
3.1. A kezdeti fajlagos nyúlás hatása

Az eddigi számításokban feltételeztük, hogy a hegesztendő szerkezeti részben nincsenek kezdeti alakváltozások. A valóságban ilyen alakváltozások létrejöhetnek előmelegítés, lángvágás vagy előfeszítés hatására, illetve több varrat esetén az előző varrat(ok) idézheti(k) elő ezeket (4. ábra). Ezek hatásának figyelembevétele a v_m módosító tényezővel történik. Ez a kezdeti nyúlással, illetve anélkül a fellépő hőterhelés hányadosával adható meg:

$$v_m = \frac{A'_T}{A_T} = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_y})}{\ln 2} \approx 1 - \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_y}. \quad (19)$$

A közelítő képlet kezdeti húzó fajlagos nyúlás (ε_l) esetén érvényes vagyis, ha $\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_y} \geq 0$.

A módosító tényező segítségével meghatározható egyszerűbb esetekben a helyes hegesztési sorrend.



4. ábra:
Kezdeti fajlagos nyúlás
a 2-jelű varrat helyén
az 1-jelű varrat hatására

Az 1-jelű varratból keletkező súlyponti szálbeli fajlagos nyúlás és görbület

$$\varepsilon_{G1} = \frac{A_{T1} t}{A}, \quad C_1 = \frac{A_{T1} t y_T}{I_x}, \quad (20)$$

valamint a fajlagos nyúlás a 2-jelű helyen

$$\varepsilon_{I12} = \varepsilon_{G1} + C_1 y_2 = A_{T1} t \left(\frac{1}{A} + \frac{y_1 y_2}{I_x} \right), \quad (21)$$

a módosító tényező, vagyis hogyan érvényesül a varrat hatása

$$v_{m12} = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\varepsilon_{I12}}{\varepsilon_y})}{\ln 2} \approx 1 - \frac{\varepsilon_{I12}}{\varepsilon_y}. \quad (22)$$

A két egymás után hegesztett 1-es és 2-es varrat hatására keletkező súlyponti szálbeli fajlagos nyúlás és görbület az első varrat okozta kezdeti fajlagos nyúlás figyelembevételével

$$\varepsilon_{G(1+2)} = \varepsilon_{G1} + v_{m12} \varepsilon_{G2} = \varepsilon_{G1} \left(1 + v_{m12} \frac{Q_{T2}}{Q_{T1}} \right), \quad (23)$$

$$C_{1+2} = C_1 + v_{m12} C_2 = C_1 \left(1 + v_{m12} \frac{Q_{T2} y_2}{Q_{T1} y_1} \right). \quad (24)$$

3.2. Hegesztés rugalmasan előhajlított állapotban

A gyártási sorrend a következő: összefűzés, befogás, előhajlítás, hegesztés, feloldás. A lényeges deformációk és repedések elkerülése érdekében előhajlítás során ajánlatos legfeljebb folyáshatárig terhelni, vagyis a maximális megengedett nyomaték

$$M_y = \frac{f_y I_x}{y_{\max}}. \quad (25)$$

Az M_y által okozott görbület és deformáció

$$C_y = \frac{M_y}{EI_x}, \quad w_y = \varepsilon_y \frac{L^2}{8 y_{\max}} \quad (26)$$

Az előhajlítás mértéke $w_p < w_y$ kisebb legyen, mint a folyáshatárhoz tartozó alakváltozás.

Hegesztés előtt, a hegesztés helyén fellépő fajlagos alakváltozás

$$\varepsilon_p = C_p y_T = w_p \frac{8 y_T}{L^2}, \quad (27)$$

a módosító tényező $v_m = 1 - \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_y}$.

A hegesztés során a gerenda görbült alakban tartásához szükséges hajlítónyomaték két részből áll: az előhajlításhoz szükséges nyomatékból

$$M' = I_\xi EC_p = 8 w_p \frac{EI_\xi}{L^2}, \quad (29)$$

és a hegesztési maradó deformációk kiküszöböléséhez szükséges nyomatékból

$$M'' = v_m I_\xi EC = 8 v_m w \frac{EI_\xi}{L^2}. \quad (30)$$

Ezek a nyomatékok ellentétesen hatnak a feloldás után, és csökkentik a deformációkat,

$$M = M' + M'' = I_\xi EC_p + v_m I_\xi EC. \quad (31)$$

A végső alakváltozás kifejezhető az alábbiakkal

$$w_f = w - w_p = \frac{M' + M''}{8 EI_x} L^2 - w_p, \quad (32)$$

$$w_f = (w_p + v_m w) \frac{I_\xi}{I_x} - w_p, \quad (33)$$

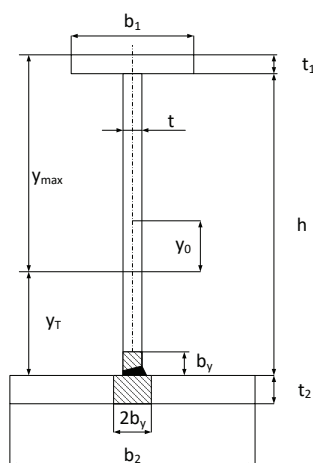
ahol $v_m = 1 - \frac{8 w_p y_T}{L^2 \varepsilon_y}$.

Az I_x a teljes keresztmetszet inercianyomatéka, I_ξ a rugalmas keresztmetszet inercianyomatéka, amelyet a hegesztési zóna csökkent, C a gerenda görbülete, amelyet szabad állapotban történő hegesztés okoz, a korrekciós tényező a (28) szerinti. A maradó hegesztési alakváltozások teljes kiküszöböléséhez szükséges előfeszítés w_p kiszámítható a $w_f = 0$ feltételből:

$$w_p = \frac{w}{\frac{I_x}{I_\xi} + \frac{8y_T w}{L^2 \varepsilon_y} - 1} \quad (34)$$

Feltételezzük, hogy a gerendánál egy hegesztett kötés van (5. ábra). A megadott paraméterek a hegesztett gerenda esetében a következők:

- A gerenda L hossza méterben, 5-10 m között változik,
- Egyenletesen megoszló F erő N-ban, 10000-100000 N között változik,
- Rugalmassági modulus E MPa-ban, 210 GPa acélokhoz, 70 GPa alumíniumhoz,
- Az f_y folyáshatár MPa-ban, 235-460 MPa között változik, alumínium esetén 80-230 MPa,
- Az anyag ρ sűrűsége kg/m^3 -ben, acéloknál 7850 kg/m^3 , alumíniumnál 2700 kg/m^3 ,
- A c fajhő $\text{J}/(\text{kgK})$ -ben, acél esetében $c = 510 \text{ J}/(\text{kgK})$, alumínium esetén $c = 910 \text{ J}/(\text{kgK})$,
- Az α hőtágulási együttható $1/\text{K}$ -ben, acéloknál $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} 1/\text{K}$, alumíniumnál $\alpha = 22 \cdot 10^{-6} 1/\text{K}$.



5. ábra: Az aszimmetrikus hegesztett szelvény méretei

A keresztmetszet méretei a következők:

- b_1 a felső öv szélessége,
- t_1 a felső öv vastagsága,
- h a gerinc magassága,
- t a gerinc vastagsága,
- b_2 az alsó öv szélessége,
- t_2 az alsó öv vastagsága.

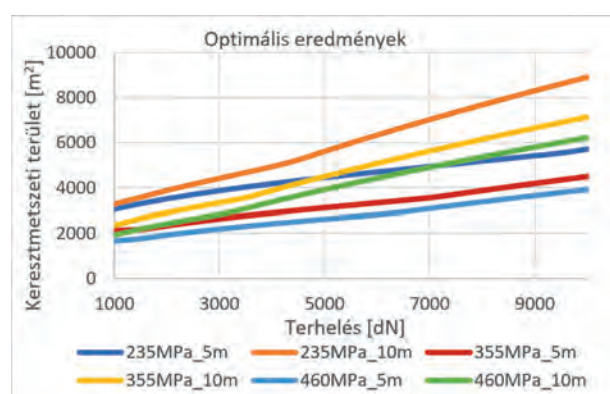
Bemenő adatok: $L = 10 \text{ m}$, $F = 98100 \text{ N}$, $f_y = 460 \text{ MPa}$, a lemez szöge hegesztés előtt: $\beta = 50^\circ$, az egységnyi varratérfogatra eső fajlagos hő $q_0 = 60700 \text{ J/m}^3$, az alkalmazott szabvány az Eurocode 3 és 9 [11, 12]. Excel fájl készítésével kiszámítottuk

az optimális méreteket minimális tömegről a statikus feszültség, a gerinc- és övhorpadás, valamint a zéró vetemedés figyelembevételével. Az eredmények a következők (1. táblázat):

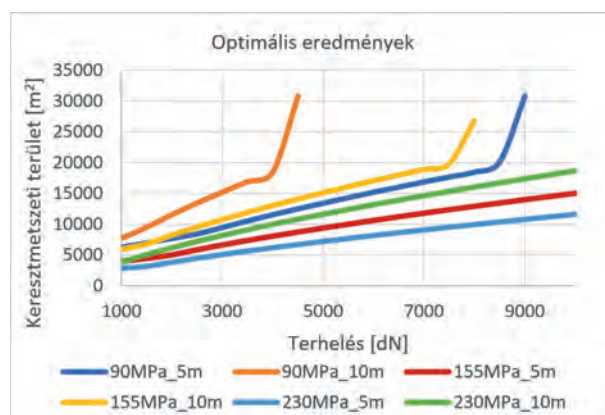
| | |
|-------|-------|
| b_1 | 188,6 |
| t_1 | 9,4 |
| h | 362,9 |
| t | 7,3 |
| b_2 | 188,6 |
| t_2 | 9,4 |

1. táblázat: A szelvény optimális méretei [mm]

Változtatva a terhelést (dN, ami tömegnél kg), a feszítávót, az acélminőséget, valamint az alumínium minőséget, össze tudjuk hasonlítani az optimális méreteket.



6. ábra: Optimális eredmények különböző szilárdságú acélok esetén



7. ábra: Optimális eredmények különböző szilárdságú alumíniumok esetén

A 6-os és 7-es ábra mutatja az optimális keresztmetszeti területet (tömeget) különböző folyáshatárú acél és különböző alumínium ötvözetek esetén. Látható, hogy közel lineáris a növekedés a terheléssel, illetve hogy a növelt folyáshatárú acéllal tömegcsökkenés érhető el. Növelve a gerenda hosszúságát jelentősen növekszik a tömeg. Alumínium esetén a terhelés növelésének alacsonyabb határa van, a lágyabb alumínium nem tud megoldást adni nagyobb terhelések esetén.

A számítások statikus terhelésre készültek. A következő lépés a dinamikus igénybevétel figyelembe vétele, mint ahogy bordázott lemezeknél ezt már megtettük [13].

4. Összefoglalás

A bemutatott két alkalmazási terület jól érzékelteti, hogy milyen hasznos a szerkezetoptimalálás, mely során a futódaru hegesztett főtartójának költségminimálása esetén a grafikus processzor kártya (GPU) programozásával a párhuzamos számítások több nagyságrenddel meggyorsulnak. Így az összetett és számításigényes feladat gyorsabban megoldható. Az aszimmetrikus I-tartó optimalálása tömegminimumra történt, rugalmas előhajlítás mellett a hegesztési vetemedés elkerülésére. Ez azt jelentette, hogy a minimális tömegű tartó egyben vetemedésmentessé vált a megfelelő előhajlítás alkalmazásával.

Köszönetnyilvánítás

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

Irodalomjegyzék

- [1] Burgolya I.: Optimalizálás evolúciós számításokkal, Typotex kiadó, Budapest, 2012
- [2] Xia Z., Wang Y., Wang Q., Mei C.: GPU parallel strategy for parameterized Ism-based topology optimization using isogeometric analysis, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol.:56, No.:2, (2017), pp. 413-434 doi: 10.1007/s00158-017-1672-x
- [3] Kalavarapu V., Winer E.: A study of graphics hardware accelerated particle swarm optimization with digital pheromones, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol: 51, No.: 6, (2015), pp. 1281-1304, doi: 10.1007/s00158-014-1215-7
- [4] Cheng J., Grossman M., McKercher T.: *Professional CUDA C programming*, John Wiley and Sons Inc., Indianapolis, 2014
- [5] Okerblom, N.O., Demyantsevich, V.P. and Baikova, I.P. *Design of Fabrication Technology of Welded Structures*. (in Russian) Leningrad, Sudpromgiz, 1963.
- [6] Vinokurov, V.A. *Welding Stresses and Distortion*. (Translated from Russian), Boston Spa, Wetherby, England, The British Library, 1977.
- [7] Masubuchi, K. *Analysis of Welded Structures*. Pergamon Press, Oxford, 1980.
- [8] Kuzminov, S.A. *Welding Deformations of Ship Structures*. (in Russian), Leningrad, Sudostroenie, 1974.
- [9] Farkas, J. and Jármay, K. *Analysis and Optimum Design of Metal Structures*. Balkema, Rotterdam-Brookfield, 1997.
- [10] Farkas, J. and Jármay, K. *Analysis of some methods for reducing residual beam curvatures due to weld shrinkage*, *Welding in the World*, vol. 41, no. 4, pp. 385-398, 1998.
- [11] Eurocode 3, *Design of steel structures*, Brussels, CEN 2009.
- [12] Eurocode 9, *Design of aluminum structures*, Brussels, CEN 2007.
- [13] Virág Z., Jármay K. *Optimum design of stiffened plates for static or dynamic loadings using different ribs*, *Struc. Eng. and Mech.*, 74 (2), 255-266 (2020)



The 75th IIW Annual Assembly and International Conference

17-22 July 2022 | Tokyo, Japan

Innovative Welding and Joining Technologies to
achieve Carbon Neutrality and
promote Sustainable Development

Hosted by



<https://www.iiw2022.com>

Supported by Tokyo Convention & Visitors Bureau