

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	$1/(-0.012+1.079/a_w^{1.5})$

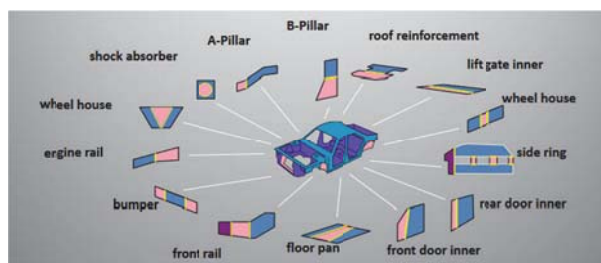
A technológiák rövidítései a következők:

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

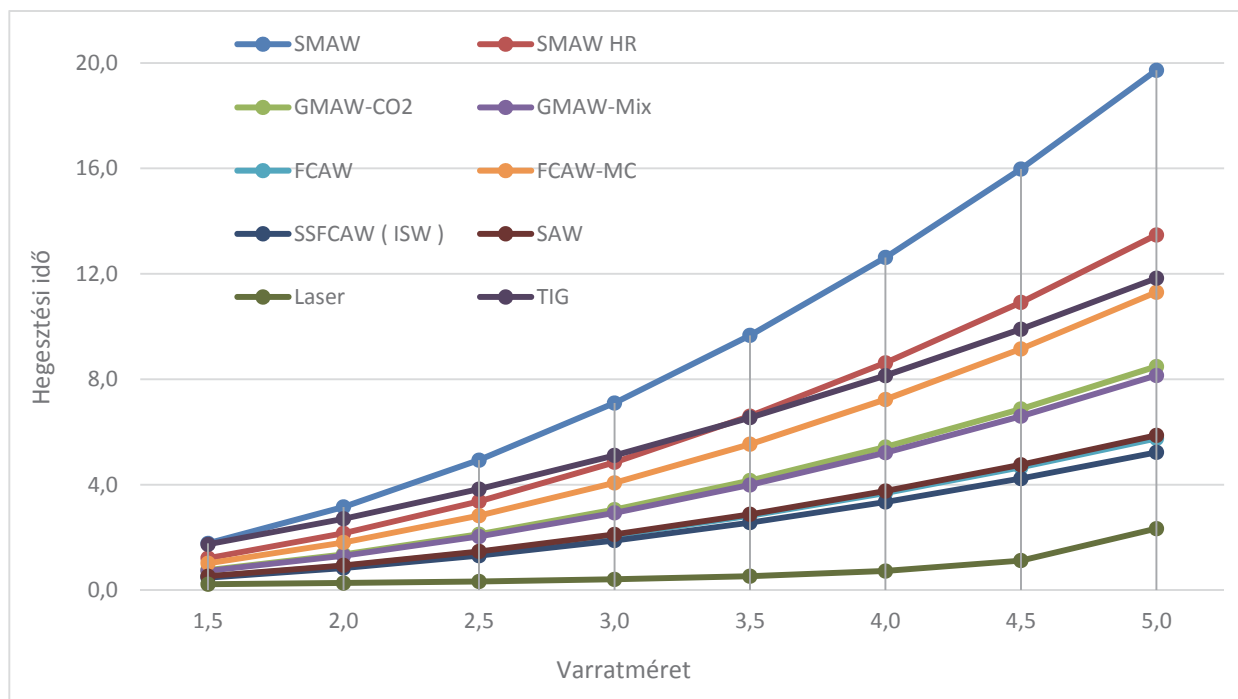
kapacitásától [17, 18]. A lézer alkalmazhatósága az autoiparban az 1. ábrán látható.

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:

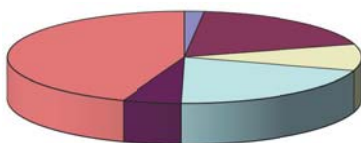
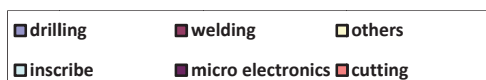
$$T_{CP} = \sum_i C_{CPi} t_i^n L_{ci} \quad (7)$$

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 gázzárast 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 lemeztvastagság 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:

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

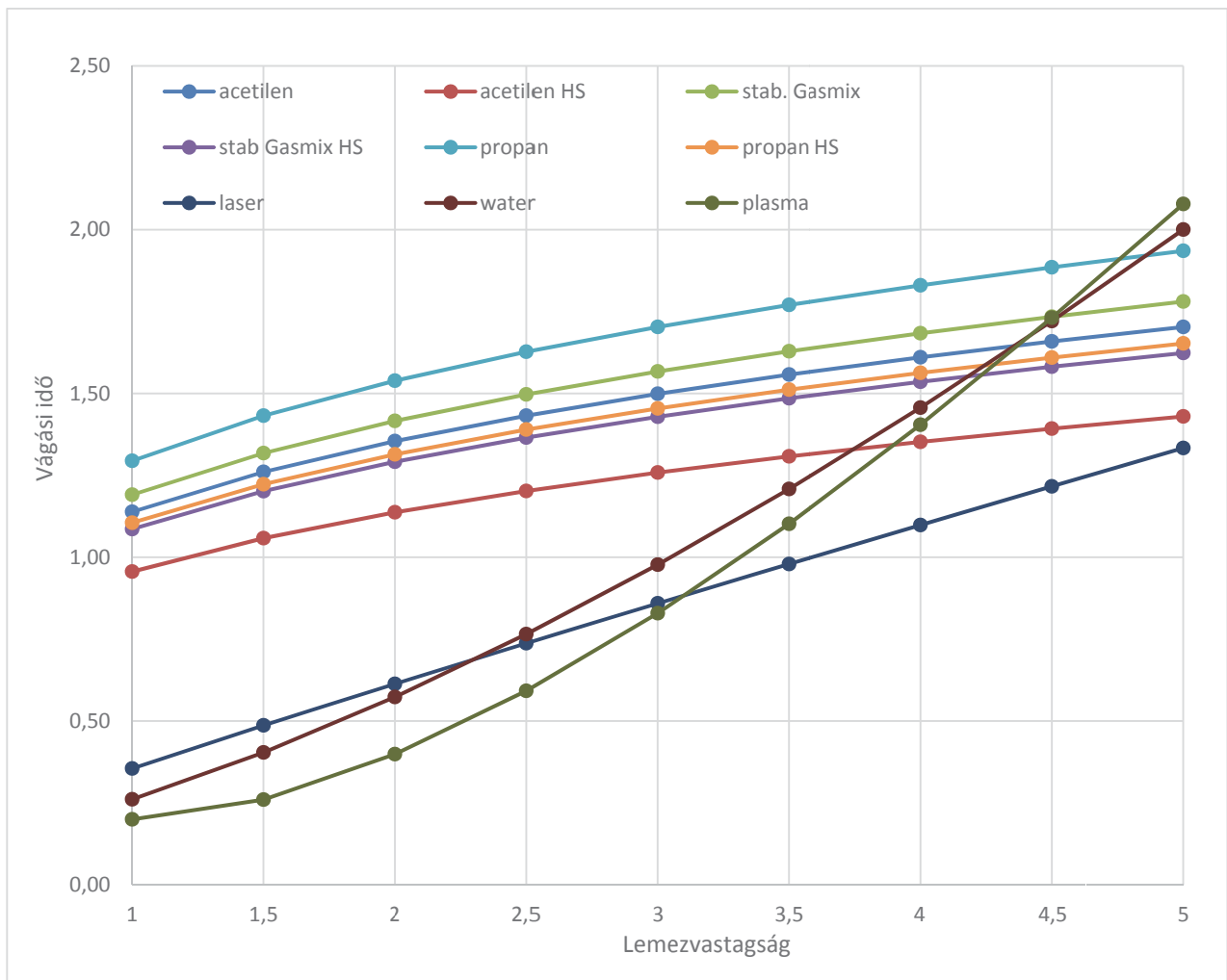
ahol a paraméter $a_{sp} = 2 \times 10^{-6}$ min/mm², Θ_{ds} a nehézségi tényező.

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

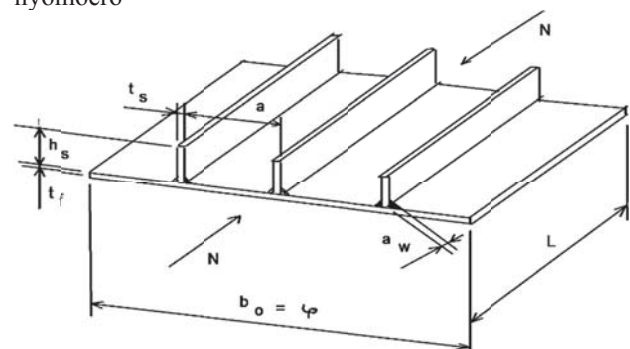
Az összköltség tartalmazza az előbb ismertetett idő és költségelemeket.

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

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.

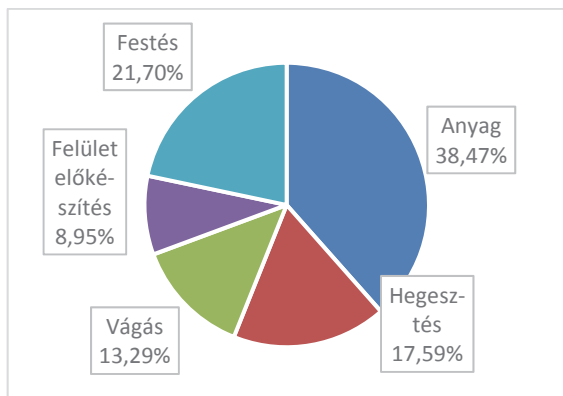
Ha különböző kezdeti körülmények között többször is elindítjuk a számítást, akkor sokkal nagyobb az esélye, hogy a megoldás a globális optimum lesz. Az algoritmus egy véletlenszerűen elosztott populációt hoz létre a kezdeti értékekből, mindegyiküket a hagyományos GRG nemlineáris algoritmus segítségével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

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

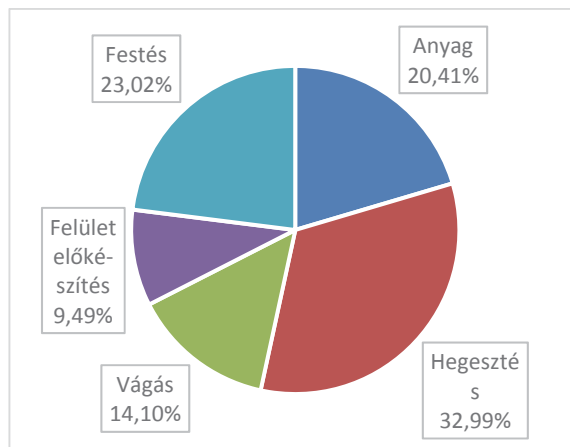
3. táblázat. Optimumok különböző költségarányokra

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 lézeres vágás mellett.

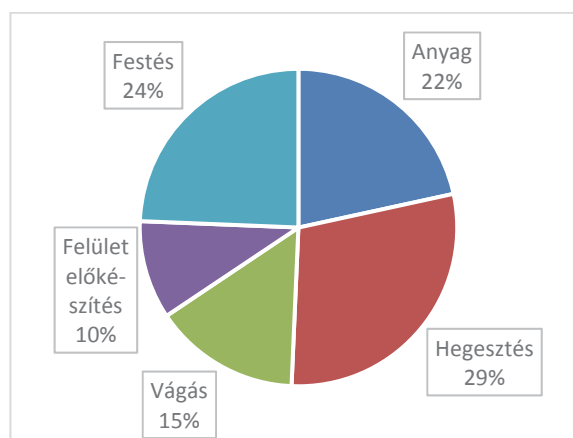


6. ábra. Költség eloszlás $k_f/k_m=1$ esetén, lézer hegesztés, lézer vágás esetén

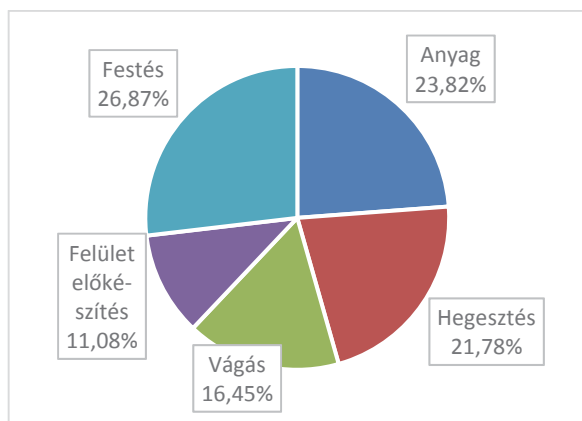


9. ábra. Költség eloszlás $k_f/k_m=2$ esetén, GMAW CO₂ hegesztés, lézer vágás esetén

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 csak 33% és a fedőporos hegesztésnél (SAW) 29%.

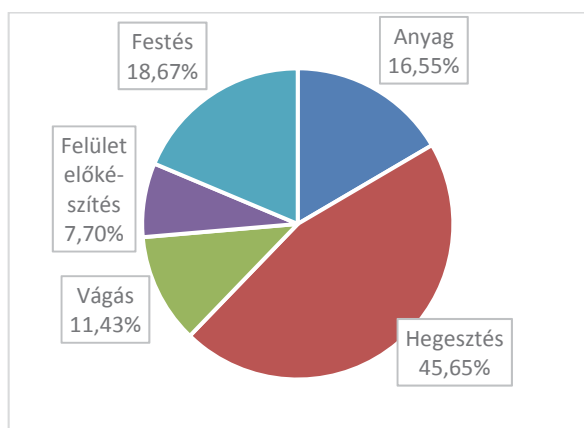


10. ábra. Költség eloszlás $k_f/k_m=2$ esetén, SAW hegesztés, lézer vágás esetén

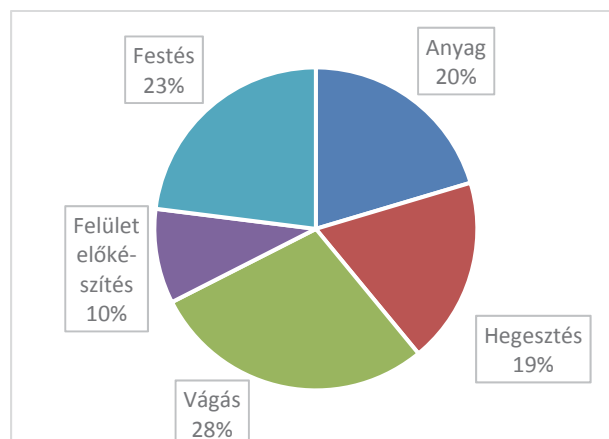


7. ábra. Költség eloszlás $k_f/k_m=2$ esetén, lézer hegesztés, lézer vágás esetén

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).