FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA XVII.

Kolozsvár, 2012. március 22–23.

NAGY ENERGIASŰRŰSÉGŰ ELJÁRÁSOK HEGESZTHETŐSÉGI SZEMPONTJAI

BAGYINSZKI Gyula, BITAY Enikő

Abstract
The material technology developments between many things the power (productivity) they take aim at his increase beside the concurrent reduction of the intake. The opportunity of the fruition of the energy economy between conditions like this the concentration of the energy the material to be cultivated - technologywise yet just necessary - his minimal volume. It stems from this so called or high power density with more widespread wording big energy density ill. the application of the procedures accomplishing this. In the case of the welding procedures coming true with the sources of heat like this the welded the goodness of bandage the stock weldability and the technological effects insured by the procedure define it. Between these owe the suture ill. the heat effect zone heating-cooling his circumstances, his geometry relations; metallurgy-, diffusion- and. his phase transformation processes.

Key words:
electron beam, laser, joint zone, microstructure, hardness, thoughness, weldability, continuity deficiencies

Összefoglalás
Az anyagtechnológiai fejlesztések többek között a teljesítmény (termelékenység) növelését célozzák az energiafelhasználás egyidejű csökkentése mellett. Az energiatakarékosság ilyen feltételek közötti megvalósulásának lehetősége az energia koncentrálása a megmunkálandó anyag – technológiailag még éppen szükséges – minimális térfogatára. Ebből fakad az ún. nagy teljesítménysűrűség vagy elterjedtebb szóhasználattal nagy energiasűrűség, illetve az ezt megvalósító eljárások alkalmazása. Az ilyen hőforrásokkal megvalósuló hegesztési eljárások esetében a hegesztett kötés jóságát az alapanyag hegeszthetősége és az eljárás által biztosított technológiai hatások határozzák meg. Ezek közé tartoznak a varrat, illetve a hőhatásövezet hevítési-hűlési körülményei, geometriai viszonyai; metallurgiai, diffúziós, illetve fázisátalakulási folyamataira.

Kulcsszavak:
elektronsugár, lézer, kötészóna, szövetszerkezet, keménység, ütőmunka, hegeszthetőség, folytonossági hiányok

1. Bevezetés

A nagy energiasűrűségű eljárások hegeszthetőségi kérdései alapvetően a következő egyszerűen kivitelezhető vizsgálatokkal elemezhetők.

a) Makrogeometria vizsgálatok:

Szemrevételezéssel és mérésekkel (közvetlenül vagy fényképek alapján) a varratfelület, illetve – keresztmetszeti csiszolaton – a kötészóna (varrat, hőhatásövezet) geometriája, azaz a sajátos hőbeviteli-hőelvonási viszonyok hatásai értékelhetők.

b) Mikroszkópi vizsgálatok:

Közvetlenül vagy fotók alapján a hegesztési hőfolyamat hatására bekövetkező fázisátalakulások és szövetszerkezeti változások hatásai követhetők nyomon a varrattól a hőhatásövezeten át az alapanyagig. Továbbá a képződő mikro- vagy makrorepedések és egyéb folytonossági hiányok előfordulása is megfigyelhetővé válik.

c) Keménységvizsgálatok:
A varrat és a hőhatásövezet keménységadatai – az anyagminőség és a technológiai paraméterek ismeretében – felvilágosítást nyújtanak az alakváltozó-képességről, a repedésképződés lehetőségéről és általában a hegeszthetőségről. A vizsgálatot Vickers-módszerrel szokás elvégezni, melynél külön előírás hiányában 98 N (10 kp) terhelőerőt kell alkalmazni.
d) Ütőmunka-vizsgálatok:
Meghatározható a hegesztett kötés adott zónájának ütőmunkája (esetleg fajlagos ütőmunkája), a próbaest laterális expanziója, sőt a töretfelület szívós és rideg jellegű részének egymáshoz viszonyított aránya is. A tompavarratok vizsgálatára szolgáló eljárásnál a vizsgálati eredmények szórására való tekintettel legalább három próbatestet kell mérési helyenként, illetve hőmérsékletenként kimunkálni, és a próbatesteket V-bemetszéssel kell ellátni.

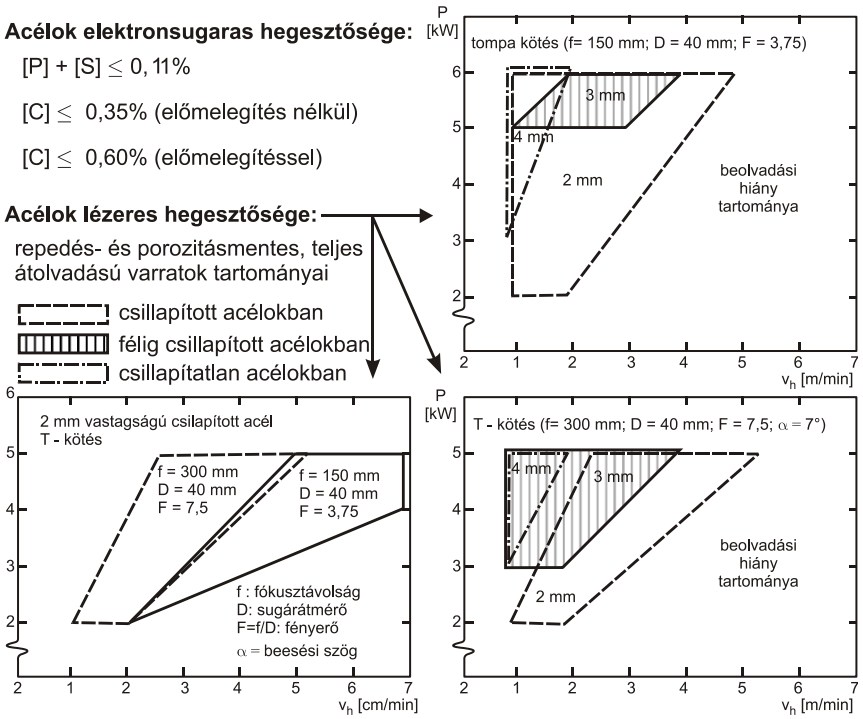
1. Hőbeviteli-hőelvonási, illetve kötészóna-viszonyok

A teljesítménysűrűség a varrat mélység/szélesség arányán és a kötés alakján keresztül befolyásolja a lehűlési sebességet és az ömledék létidejét. Ez nemcsak a varrat szövetszerkezetét határozza meg, hanem azokat az időtartamokat is, amelyek alatt a kötészóna egy-egy kritikus hőmérséklet-tartományon keresztüljut.
Mérsékelt energiasűrűség és a sugár nem túl gyors mozgatása esetén a munkadarab a felülettől kiindulva felmelegszik, és a hővezetés gömbfelülethez közel álló izotermákat hoz létre. Ennek megfelelően a hagyományos ömlesztőhegesztések varrataihoz hasonló alakot kapunk, vagyis az egy varratsorral létrehozott kötés mélysége alig lesz nagyobb a szélességénél. Ha az energiasűrűséget növeljük – a sugarat kisebb foltra fókuszáljuk, illetve a teljesítményt fokozzuk –, a behatolási mélység sokkal jobban nő, mint a szélesség, így relatíve keskeny ömledék-, illetve varratzóna és hőhatásövezet jön létre. Ha a hegesztés viszonylag vékony (gyakran alkalmazott méretű) lemezeken történik, akkor feltételezhető az is, hogy függőleges irányban nem lépnek fel jelentős változások, és a sugár egy mozgó vonalforrással helyettesíthető. A munkadarabbal közölt teljesítmény és a hegesztési sebesség (fajlagos hőbevitel) változtatásával a varrat szélessége befolyásolható, azaz adott esetben növelhető is.
Az amúgy is csekély deformáció csökkentésének, illetve szabályozásának technológiai módszerei a bevitt hőmennyiségen és a varratalakon keresztül érvényesülnek. A legkeskenyebb varrat és a csaknem párhuzamos varratoldal a lehető legkisebb sugárteljesítménnyel (de az elérhető legnagyobb teljesítménysűrűséggel) és a lehető legnagyobb megengedhető hegesztési sebességgel készíthető.
A lézeres hegesztésnél a varrat mélységének és szélességének aránya kisebb, mint elektronsugaras hegesztésnél, így kevésbé érzékeny arra a dermedési problémára, amikor is szilárduláskor az utoljára megdermedő vonalban, az oszlopos krisztallitok találkozásánál a szennyeződések összegyűlnek, és ridegedést, metallurgiai bemetszést, illetve melegrepedést okozhatnak.
Az elektronsugarasan hegesztett varratok legmélyebb pontján – nem teljes átolvasztásnál – jelentkező kihegyesedés (lándzsahatás) veszélye is lényegesen kisebb lézeres hegesztésnél, mivel a fénysugár fókuszolásánál a gyök tartományában az energiasűrűség kisebb.

2. Fázisátalakulások, szövetszerkezeti változások

A nagy tejesítménysűrűség eredményeképpen gyorsan létrejövő és mély ömledéket fajlagosan nagy határfelület választja el a szilárd anyagtól, illetve a megömlesztett térfogat kicsi a munkadarab össztérfogatához képest, így az ömledék igen gyorsan hűl. A hevítés és a lehűlés sebességének ilyen megnövekedése jelentősen megváltoztatja, eltolja az acélok kritikus átalakulási hőmérsékleteit, és ez befolyásolja a fázisátalakulást szenvedő anyag mennyiségét.

A hőhatásövezet gyors hevítése kiválthatja igen nagy számú, elnyúlt alakú ausztenitcsíra keletkezését, és a túlhevülés ellenére sem lép fel szemcsedurvulás (legfeljebb az eredeti szemcsenagyság öröklődik). A varrat finom szemcseszerkezete nem kedvez a repedések keletkezésének.
A legtöbb ötvözetlen és gyengén ötvözött acélban – a hegesztés utáni hűlési sebességtől függően – többé-kevésbé martenzites, bainites szövetszerkezet alakul ki, mely kemény és repedésre hajlamosít. Ha lehet, törekedni kell a varrat hűlési sebességének csökkentésére. Ez megtehető a sugár defókuszolásával vagy lengetésével, de még inkább a darab előmelegítésével és/vagy hegesztés utáni esetleges hőntartásával. Számos acélban még az elektronsugaras hegesztésre jellemző nagy hűlési sebesség esetén sem keletkezik nagy mennyiségű, illetve nagy keménységű martenzit.
Az acélok hegeszthetőségének legegyszerűbb megfogalmazása a **1. ábrá**n látható az elektronsugaras és a lézeres hegesztésre vonatkozóan. Mint látható, a két fő szennyező (P-, S-) és a C-tartalom értéke maximalizálandó a meleg-, illetve a hidegrepedés, valamint az azokat elősegítő káros szövetszerkezeti változások elkerülése érdekében. Természetesen a hegesztési munkarend elemeit is hozzá kell igazítani az anyagösszetételhez.



1. ábra. *Acélok elektronsugaras és lézeres hegeszthetősége*

Repedés- és porozitásmentes lézerrel hegesztett varratok létrehozása is az acélgyártás során visszamaradó szennyező-, illetve zárványtartalom mennyiségétől (csillapítás mértékétől) függ a fajlagos hőbevitel (teljesítmény, hegesztési sebesség) mellett. Továbbá az is megfigyelhető a diagramokon, hogy a jó kötésminőséget némileg a fókuszolási paraméterek is befolyásolják.
Az eltérő minőségű fémek (ötvözetek) hegeszthetőségének két alapvető feltétele van:

– A két fém képes legyen egyidejűleg megömleni és közös ömledéket képezni. Ez a feltétel nehezen teljesül, ha a két fém olvadáspontja messze esik egymástól, vagy a hővezetőképességük nagyon különbözik. Ezért ha szükséges, a sugarat aszimmetrikusan irányítják a nehezebben megömlő fém felé.
– A két fém metallurgiailag kompatibilis legyen, azaz ne keletkezzenek megengedhetetlen intermetallikus fázisok, átmeneti vegyületformák a hegesztési folyamat során. Ha két ötvözet

kötéséről van szó, még hozzávetőlegesen sem lehet következtetést levonni az egyensúlyi diagramokból, hanem előzetes kísérleteket kell végezni. Tájékoztató információk nyerhetők néhány anyagra vonatkozóan a **2. ábrá**ból.

	Ezüst	Alumínium	Arany	Berillium	Kobalt	Réz	Vas	Magnézium	Molibdén	Nióbium	Nikkel	Platina	Rénium	Ón	Tantál	Titán	Volfrám
Alumínium	2																
Arany	1	5															
Berillium	5	2	5														
Kobalt	3	5	2	5													
Réz	2	2	1	5	2												
Vas	3	5	2	5	2	2											
Magnézium	5	2	5	5	5	5	3										
Molibdén	3	5	2	5	5	3	2	3									
Nióbium	4	5	4	5	5	2	5	4	1								
Nikkel	2	5	1	5	1	1	2	5	5	5							
Platina	1	5	1	5	1	1	1	5	2	5	1						
Rénium	3	4	4	5	1	3	5	4	5	5	3	2					
Ón	2	2	5	3	5	2	5	5	3	5	5	5	3				
Tantál	5	5	4	5	5	3	5	4	1	1	5	5	5	3			
Titán	2	5	5	5	5	5	5	3	1	1	5	5	5	5	1		
Volfrám	3	5	4	5	5	3	5	3	1	1	5	1	5	3	1	2	
Cirkónium	5	5	5	5	5	5	5	3	5	1	5	5	5	5	2	1	5

1: Nagyon ajánlott (szilárd oldat)

2: Ajánlott
3: Feltételesen ajánlott

4: Határhelyzet
5: Nem ajánlott (átmeneti vegyületformák)

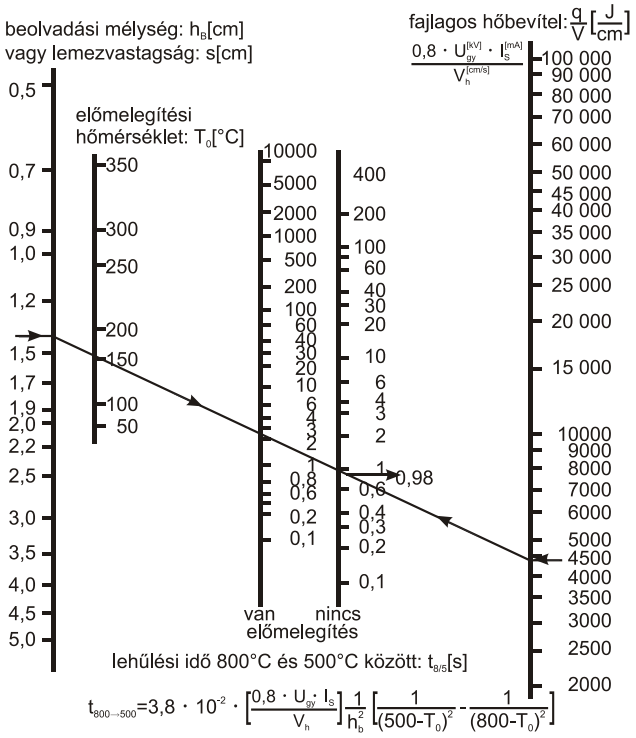
2. ábra. *Különböző anyagpárosítások elektronsugaras hegeszthetősége*

3. Alakváltozó-képességi, illetve keménységi jellemzők

Az acélok hegesztési hőfolyamatában létrejövő gyors dermedés és fázisátalakulások során bekövetkezhető beedződés – martenzites szövet képződése – jelentősen csökkenti az adott zóna alakváltozó képességét. Az ugyancsak fellépő helyi belső feszültségcsúcsok folytán ilyen módon megnő a hidegrepedés veszélye. Az alakváltozó-képességet a keménységgel szokás jellemezni, ami szoros összefüggésben van a martenzittartalommal. Ezt pedig a karbonegyenérték (C + ötvözők) és adott hőmérséklet-tartományban létrejövő lehűlési sebesség (hűlési idő) befolyásolja.

A nagy energiasűrűségű – főként az elektonsugaras – hegeszthetőséget a varratban kialakuló maximális keménység határozza meg. A varratfém-keménység előrejelző (predikciós) egyenlet egy hűlési függvény és egy ötvözőelem-függvény alapján állítható elő, vagyis meghatározandó a C_e karbonegyenérték, illetve a 800 °C és 500 °C közötti $t_{800\rightarrow500}$ lehűlési idő. Egyébként ez a lehűlési idő az **3. ábra** nomogramjából is meghatározható.

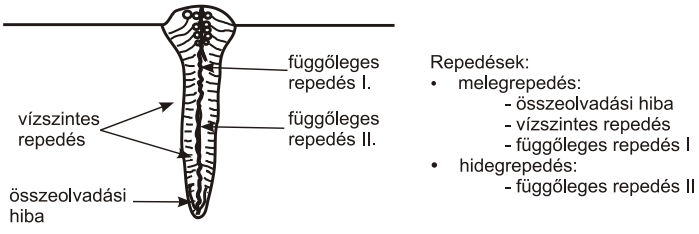
Ismeretes, hogy a hegesztett kötés maximális keménysége becsülhető a hegesztésre kidolgozott – folyamatos hűlésre vonatkozó – átalakulási diagramokból, illetve meghatározhatók a még teljesen martenzites és a martenzitet már nem tartalmazó szövetszerkezet kialakulását lehetővé tevő lehűlési idők is. Rajzolható folyamatos hűlésre vonatkozó átalakulási szövetszerkezet-keménységi diagram is, mely adott anyagnál lehetővé teszi a várható szövetszerkezet és keménység előrejelzését is a hegesztési körülményektől függő lehűlési idő ismeretében.



3. ábra. *800 °C és 500 °C közötti lehűlési idő meghatározásának nomogramja*

4. Repedésképződés, ridegtörési érzékenység

Hegesztésnél mind a varratfémben, mind a hőhatásövezetben (alapanyagban) létrejöhet repedés, ha az alakváltozó-képesség kisebb, mint a belső feszültségek által létrehozott alakváltozás. A **4. ábra** elektronsugárral mélyhegesztett varratok jellegzetes repedéstípusait mutatja be. A II. típusú függőleges repedés jellemzően hidegrepedés, alacsony hőmérsékleten jön létre a hegesztési hőfolyamat befejező szakaszában, esetleg azt követően. Jellegére nézve ridegtöret, és kialakulása összefügg a varrat, illetve a hőhatásövezet csökkent alakváltozó képességével, azaz a bekövetkező beedződés okozta martenzites szövetszerkezettel, valamint az acélban lévő diffúzióképes hidrogéntartalommal is. E repedésfajta elkerülése érdekében szükséges a karbontartalom értékét korlátozni és/vagy előmelegíteni.



4. ábra. *Acélok elektronsugaras hegesztésénél előforduló folytonossági hiányok*

Az I. típusú függőleges repedés, a vízszintes repedés és az összeolvadási hiba (hidegráfolyás) a melegrepedések közé tartozik, mivel a kristályosodás (dermedés) során jönnek létre. Míg ez utóbbi egyfajta mechanikai eredetű folytonossági hiány, addig az előzőek metallurgiai okokra vezethetők vissza. A szemcsehatárokon alacsony olvadáspontú folyadékhártya alakulhat ki, amely a szennyezőkben feldúsul, majd a dermedési zsugorodásból származó húzófeszültségek repedéssé nyitják ezt a későn dermedő hártyát. Ennek elkerülése teszi szükségessé a S- és a P-tartalom alacsony

értéken tartását vagy szükség esetén a varratmélység és a varratszélesség arányának csökkentését. A nagyobb varratmélység (beolvadás) kedvez a melegrepedések létrejöttének, míg a hidegrepedés viszont csak 600 HV_{10} varratkeménység felett jelent számottevő veszélyt.

5. Összefoglalás, következtetések

Mivel a hegesztés, illetve a szükséges energia közlése viszonylag kis anyagtérfogatra koncentrálódik, a kialakuló kötés szerkezete és tulajdonságai szükségképpen eltérnek a hegesztendő anyagokétól. Ezek a lokális (helyi) eltérések befolyásolják a hegesztett gyártmány megkívánt követelményeknek (repedésmentesség, illetve ridegtöréssel szembeni biztonság, előírt mikroszerkezet, megfelelő mechanikai és egyéb, pl. korróziós tulajdonságok) való megfelelését. Az anyagok hegeszthetősége tehát a létrehozott hegesztett kötések helyi tulajdonságainak és azok teljes gyártmányra gyakorolt hatásainak a mindenkori követelményekkel való összhangja alapján ítélhető meg. A hegeszthetőség ezen általános értelmezését igyekeztünk konkretizálni a nagy energiasűrűségű elektronsugaras és lézeres hegesztésekre vonatkoztatva.

Irodalom

[1] Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Hegesztéstechnika I. – Eljárások és gépesítés*. Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2010.

[2] Bitay Enikő – Bagyinszki Gyula: *Nagy energiasűrűségű hegesztési eljárások többszempontú rendszerezése*. Műszaki Tudományos Füzetek XV. FMTÜ, EME kiadványa, Kolozsvár, 2010. 55–66.

[3] Bagyinszki Gyula – Bitay Enikő: *Lézeres anyagtechnológiák energiasűrűségi jellemzői*. Műszaki Tudományos Füzetek X. FMTÜ, EME kiadványa, Kolozsvár, 2005. 75–80.

[4] Bagyinszki Gyula – Czinege Imre: *Fémek gyártási eljárásai: előállító-, alakadó- és kötőtechnológiák.* Széchenyi István Egyetem, Győr, 2006.

[5] Bagyinszki Gyula: *Nagy energiasűrűségű hegesztési eljárással készített kötések hegeszthetőségének kérdései.* (Hegesztő szakmérnöki diplomaterv). BME Mechanikai Technológia és Anyagszerkezettani Intézet, 1993.

[6] Yoshiaki Arata (ed.): *Plasma, Electron and Laser Beam Technology*. American Society for Metals, Ohio, 1986.

[7] Ernest F. Nippes (coord.): *Metals Handbook Ninth Edition Volume 6, Welding, Brazing and Soldering*. American Society for Metals, Ohio, 1983.

[8] N. N. Rykalin – A. A. Uglov – I. V. Zuev – A. N. Kokora: *Lazernaja i elektronno-lucevaja obrabotka materialov*. Izdatelstvo „Masinostroenie", Moskva, 1985.

[9] J. D. Russel (ed.): *Power Beam Technology*. Woodhead Publishing Ltd, Abington Hall, 1991.

[10] Dieter Schuöcker: *A lézeres hegesztés technikája*. Gép XLII., 1990. 11. 401–405.

[11] Thomas Varga: *A lézerhegesztések vizsgálata*. Gép XLII., 1990.11. 406–411.

[12] P. Hart: *Effects of steel inclusions and residual elements on weldability*. Metal Construction 18., 1986.10. 610–616.

[13] C. J. Dawes: *CO_2 laser welding low carbon steel sheet*. The Welding Institute Research Bulletin, 1983.8. 260-265.

[14] Leonard P. Connor (ed.): *Welding Handbook Eight Edition. Volume ., Welding Technology*. American Welding Society, Miami, 1987.

[15] Artinger István – Czoboly Ernő: *Ridegtörés vizsgálati módszerei*. Gép XXII., 1970.12. 464–471.

Bagyinszki Gyula egyetemi docens
Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
H-1081 Budapest, Népszínház u. 8, Hungary
E-mail: bagyinszki.gyula@bgk.uni-obuda.hu

Bitay Enikő egyetemi docens
Sapientia – Erdélyi Magyar Tudományegyetem,
Műszaki és Humántudományok Kar, 540485, Románia,
Marosvásárhely (Koronka), Segesvári út 1.c.
E-mail: ebitay@ms.sapientia.ro