

Dr. Kovács Mihály
főiskolai docens
Budapesti Műszaki Főiskola

Áttekintés a hidrogén okozta repedésveszély elkerülésére alkalmazott módszerekről

(Überblick der Methoden zum Vermeiden von Wasserstoffrisiken)
(Survey of methods for avoiding hydrogen cracking)

A melegen hengerelt ötvöztelen, ill. finomszemcsés, nagyszilárdságú C-Mn acélok, továbbá a Cr-mal, Mo-nel ötvözött melegszilárd acélok, valamint a Ni-ötvözésű hidegszívós acélok hegeszthetőségével az elmúlt 15 év során számos szakcikk, előadás foglalkozott. Az acélok hidrogén okozta repedésveszélyének elkerülésére alkalmas hegesztési munkarend meghatározására többféle módszer is ismeretes, melyek azonban mindezidáig nem jelentek meg összefoglaló formában. Ezt a hiányt pótolja az EN 1011-2 szabvány, amely jóváhagyó közleménnyel magyar szabványként 2001-ben hatályba lépett. Mint ismeretes, a CEN/TC 121 „Hegesztés” műszaki bizottsága az EN 1011-es szabványsorozatnak „Ajánlások fémek hegesztéséhez” címet adta. Az MSZ EN 1011-1:2001 szabvány az acélok ívhegesztéséhez használt általános irányelvekkel foglalkozik, melynek magyarul is lefordított változatában - időközben - kisebb módosítást hajtottak végre. Az EN 1011-2 szabvány a ferrites acélok, az EN 1011-3 a korrózióálló acélok, végül az EN 1011-4 az alumínium és alumíniumötvözetek hegesztéséhez javasol ajánlásokat. A következőkben az EN 1011-2 szabvány kapcsán áttekintést kívánunk adni a gyakorlatban alkalmazható módszerekről. A 49 oldalas szabvány egyébként függelékben tartalmazza (közel 40 oldalon) a hegesztési munkarend meghatározásának módszereit informatív jelleggel.

Az [1]-ben ismertetett módszer ötvöztelen, finomszemcsés és gyengén ötvözött acélokra vonatkozik. A C és az ötvözők acélok repedésveszélyére gyakorolt hatását az IIW által 1967-ben ismertetett karbonegyenértékkel lehetett figyelembe venni, amelyet a melegen hengerelt, ötvöztelen szerkezeti acélokra vonatkozó MSZ EN 10025:1998 szabvány is tartalmaz:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \%$$

melynek érvényessége:

Elemek, tömegszázalék							
C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	Mo	V
0,05...0,25	max.0,8	max.1,7	max.0,9	max.1,0	max.2,5	max.0,75	max.0,2

ill. CE = 0,3...0,7 %. Az összefüggés B-tartalmú acélokra, ill. 1 % vagy annál nagyobb Cr-tartalmú melegszilárd acélokra nem alkalmazható.

Az acélok hegesztéskor, ill. azt követő hőkezeléskor bekövetkező esetleges repedési veszélyeire utal az **1. ábra** [2]. A hidrogén okozta repedésveszély általában fennáll, ha a diffúzióképes hidrogéntartalom egy kritikus értéket meghalad. Ilyen esetekben a belső feszültségek hatására az edződési zónában repedések képződhetnek, ha a hegyanyag szobahőmérsékletre hűlt. Ezért lényeges, hogy a hűlés utolsó fázisában (300...100 °C között) a lehűlés ellenőrzött legyen. A hidegrepedések keletkezésében a hidrogén mellett jelentős szerepet játszanak a szerkezeti elemekben hegesztéskor jelen lévő nagy maradófeszültségek, ill. repedésérzékeny fázisok (pl. martenzit). Az acélok hidrogén okozta repedésérzékenységről részletesebb információkat a [3] tartalmaz. A ferrites hegyanyag diffúzióképes hidrogéntartalmának (HD) meghatározását a jóváhagyó közleménnyel megjelent MSZ EN ISO 3690:2002 szabvány szerint kell elvégezni.

A dokumentum kidolgozói a 100 g leolvasztott hegyanyagra vonatkozó, ml-ben vagy cm³-ben mért diffúzióképes hidrogéntartalom alapján 5 hidrogénosztályt (A...E) határoztak meg, melyet a **Hegesztéstechnika** előző száma közölt [4]. A lehűlés mértékét számos tényező befolyásolja, így pl. az alkalmazott hegesztési eljárás, a bevitt hőmennyiség, a szerkezeti elemek vastagsága, a kötés kialakítása stb. A egységnyi szakaszra bevitt hőmennyiség (fajlagos hőbevitel vagy [5] szerint vonalenergia) meghatározható a

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad \text{kJ/mm}$$

képlettel, ahol k a (relatív) termikus hatásfok, melynek értékét fedett ívű hegesztéskor

$k=1$ -nek vették, míg AWI hegesztésnél $k=0,6$, a többi ívhegesztő eljárásnál pedig $k=0,8$. A képletben az U -t V-ban, az I -t amperben, a hegesztési sebességet (v) mm/s-ban kell behelyettesíteni.

Bevont elektródás ívhegesztéskor a gyártói hegesztési utasításban a fajlagos hőbevitelt csak akkor kell feltüntetni, ha az szükséges. Megadható viszont a WPS-ben az elektróda kihúzási hossza. A kihúzási hossz (l_{ki}) - a bevont elektródával folyamatosan lerakott varrathossz - egyenesen arányos az elektródaátmérő (d_e) négyzetével, a hasznos hosszával (l_{eh}), a névleges kihozatalával (R_N), ill. fordítottan arányos a fajlagos hőbevitellel (Q):

$$l_{ki} = \frac{d_e^2 \cdot l_{eh} \cdot F}{Q} \text{ mm,}$$

ahol $l_{eh} = l_e - 40$ mm (elektródavég), az F tényező pedig az elektróda névleges kihozatalától függő érték kJ/mm³-ben (értéke 0,0368...0,0608 között változhat) [6]. Ha előírják pl. a kihúzási hosszat, akkor jó közelítéssel meghatározható az ahhoz szükséges fajlagos hőbevitel. A **2. ábra** a kihúzási viszony (a kihúzási hossz leolvasztandó névleges elektródahosszhoz viszonyított értéke) és a fajlagos hőbevitel kapcsolatát mutatja nagyszilárdságú acélok hegesztésekor, az elektródaátmérők és a sarokvarrat „a” mérete függvényében [7].

A javasolt előmelegítési hőmérsékleteket nomogramokból lehet meghatározni, ehhez szükséges ismerni a kombinált vastagságot. A kombinált vastagság (d_k) az alapanyag ömledékvonaltól 75 mm távolságra számított közepes vastagsága, melyekre példákat a **3. ábra** mutat [8]. A szabvány 11 nomogramot mutat be az előmelegítési hőmérséklet meghatározásához, melyhez ismerni kell a CE-t, a HD-t, a fajlagos hőbevitelt és a kombinált vastagságot. A **4. ábra** CE = 0,4 karbon-egyenérték, $Q = 1,5$ kJ/mm fajlagos hőbevitel, a hidrogénosztály és $d_k = 75$ mm esetén mutatja a javasolt előmelegítési hőmérsékletet, $T_p = 100$ °C-ot. A nomogrammal előírt előmelegítési hőmérséklethez is meghatározható a szükséges hőbevitel.

A másik módszer a jóváhagyó közleményes, a fémek csoportosítási rendszerének irányelveit tartalmazó MSZ CR ISO 15608:2001 szerinti 1...4 anyagcsoportokra

érvényes. Uwer a Thyssen cégnél már a 70-es évek közepén foglalkozott az ívhegesztés hőmérsékletciklusaival, a lehülési idő grafikus és matematikai meghatározásával. Uwer és Höhne a 90-es évek elején 51 különböző összetételű, 30 mm vastagságú szerkezeti acélon végzett hegesztési kísérleteket, melyekről [9] és [10]-ben számoltak be. Szerzők a vizsgálataikat repedésérzékenységi vizsgálatokkal (Tekken ill. CTS próbák) ellenőrizték. A kísérletek összefoglaló eredményeiről jelen cikk szerzője a Hegesztéstechnika folyóiratban 1992-ben közölt összefoglalást [11].

Az általuk meghatározott karbonegyenérték:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \%$$

melynek érvényessége:

Elemek, tömegszázalék							
C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	Mo	V
0,05...0,32	max.0,8	0,5...1,9	max.1,5	max.0,7	max.2,5	max.0,75	max.0,18

továbbá Nb = max. 0,06%, Ti max. 0,12%, B max. 0,005%.

A vizsgálatok során meghatározott összefüggések CET= 0,2...0,5% között, ill. $R_{p0,2} < 1000$ MPa acéloknál alkalmazhatók az alábbi feltételek esetén: $d = 10...60$ mm, $HD = 1...20$ ml/100g, $Q=0,5...4,0$ kJ/mm. A szerzők külön vizsgálták a CET, a vastagság, a hidrogéntartalom és a fajlagos hőbevitel előmelegítési hőmérsékletre (T_p) gyakorolt hatását. Az előmelegítési hőmérsékletre az EN 1011-2-ben megadott, a [11]-ben leírtaktól alig eltérő következő összefüggést határozták meg:

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \operatorname{th}\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

ahol HD a diffúzióképes hidrogéntartalom ml/100g-ban, d az anyagvastagság mm-ben, Q a fajlagos hőbevitel kJ/mm-ben, CET a karbonegyenérték %-ban. A CET és a CE karbonegyenértékeket nem javasolt összehasonlítani, mivel azok az egyes ötvözőelemek hatását másképpen veszik figyelembe. A lemezvastagság, a CET, a Q és a HD ismeretében az előmelegítési hőmérsékletek a szabványban lévő diagramokból is meghatározhatók. Cr-Mo és Cr-Mo-V ötvöztetésű 5...6. acélcsoportú melegsziárd, ill. 9. anyagcsoportú Ni-ötvöztetésű (Ni=3,5...9%) acélok hidrogén okozta

repedés veszélyének elkerülésére javasolt előmelegítési és rétegekőzi hőmérsékleteket a HD függvényében lásd a [4] 2. és 3. táblázatában.

A hegesztési feltételeknek hőhatásövezet mechanikai-technológiai tulajdonságaira és a hegesztés alatti hőmérséklet-idő lefolyásra gyakorolt hatásának meghatározására Degenkolbe, Uwer és Wegmann általi, Rikalin 1947-ben kidolgozott összefüggéseire épülő, a 70-es években végzett hőciklus-számításokon alapuló összefüggések alkalmasak [7] A számítások kétirányú (2D) vagy háromirányú (3D) hőelvezetési esetekre vonatkoznak (**5. ábra**). A szerzők bevezették az alaktényező fogalmát, melynek értékeit az **1. táblázatból** lehet kivenni:

Varrattípus		Alaktényező	
		F_2 kétirányú hőelvezetés (2D)	F_3 háromirányú hőelvezetés (3D)
Felrakóvarrat lemezen		1	1
Rétegekőzi tompavarrat		0,9	0,9
Egyrétegű sarokvarrat sarokkötéskor		0,9...0,67	0,67
Egyrétegű sarokvarrat T kötéskor		0,45...0,67	0,67

1. táblázat: Az alaktényező megválasztása a varrattípus és a hőelvezetés függvényében

Vékony lemezeknél (kétirányú hőelvezetés) a hőbevitel (Q), a lemezvastagság (d), a lemez kiindulási hőmérséklete (T_o) ismeretében a 800...500 °C között eltelt hűlési idő ($t_{8/5}$) számítható (vagy nomogramból kiválasztható):

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 \cdot T_o) \cdot 10^5 \cdot \frac{Q^2}{d^2} \cdot \left[\frac{1}{(500 - T_o)^2} - \frac{1}{(800 - T_o)^2} \right] \cdot F_2$$

A képletben a Q -t KJ/mm-ben, a d -t mm-ben, a T_o -t °C-ban kell behelyettesíteni.

Vastag lemezeknél (háromirányú hőelvezetés) a munkadarab vastagsága nem játszik szerepet a hőelvezetésben, így a lehűlési idő az alábbiak szerint számítható (vagy nomogramból kiválasztható):

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot T_o) \cdot Q \left[\frac{1}{500 - T_o} - \frac{1}{800 - T_o} \right] F_3$$

Az egyenletekben a hőfizikai jellemzőket állandó értékkel vették figyelembe. A hőfizikai jellemzők hőmérsékletfüggésének a hegesztési varratok hűlési idejére gyakorolt hatásait Görbe Zoltán vizsgálta, melyről a szerző [12]-ben számolt be. A heganyag $t_{8/5}$ lehűlési időtől függő változásait mutatja a **6. ábra**. Értékét meghatározzák a kötésre előírt mechanikai tulajdonságok minimális, ill. maximális értékei.

A két egyenlet egyenlővé tételével (feltételezve, hogy $F_2 = F_3$), meghatározható a két- illetve háromirányú hőelvezetést elválasztó határvastagság (d_t)

$$d_t = \sqrt{\frac{(4300 - 4,3 \cdot T_o) \cdot 10^5}{6700 - 5 \cdot T_o} \cdot Q \left[\frac{1}{500 - T_o} + \frac{1}{800 - T_o} \right]}$$

Ha $T_o = 20$ °C akkor $d_t = 14,7 \cdot \sqrt{Q}$, $T_o = 100$ °C-nál $d_t = 15,66 \cdot \sqrt{Q}$ képlettel számítható. $Q = 1$ kJ/mm esetén tehát a határvastagság 14,7 mm, illetve 15,66 mm. Megjegyzendő, hogy a közelmúltban Balogh és Kirk új hőmodellt dolgozott ki középvastag (2,5D) lemezekre [13].

Az előmelegítési hőmérséklet meghatározásra 1969-ben Japánban Ito és Bessyo dolgozott ki módszert [14]. Az általuk meghatározott repedési paraméter:

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

melynek érvényessége:

Elemek, tömegszázalék							
C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	Mo	V
0,07...0,22	max.0,6	0,4...1,4	max.1,2	max.0,5	max.1,2	max. 0,7	max.0,12

továbbá B max. 0,005%.

A P_{cm} kiszámítása után egy repedésérzékenységi indexet kell meghatározni számítással vagy táblázatból. Számítás esetén az érzékenységi index = $12P_{cm} + \lg$

HD képlettel határozható meg, ahol HD három kategóriája különböztethető meg:

H1 \leq 5 ml/100g (extra kis H-tartalom)

H2 \leq 10 ml/100g (kis H tartalom)

H3 > 10 ml/100g nem ellenőrzött H-tartalom.

Az érzékenységi index ismeretében megválasztható a **2. táblázat** szerint az indexcsoport:

Indexcsoport	A	B	C	D	E	F	G
Érzékenységi index	< 3,0	3,1-3,5	3,6-4,0	4,1-4,5	4,6-5,0	5,1-5,5	5,6-7,0

2. táblázat: Az érzékenységi index és az indexcsoport kapcsolata

Az előmelegítési hőmérsékletet az indexcsoport és a lemezvastagság függvényében a **3. táblázat** szerint lehet meghatározni:

Hidrogéntartalom, HD, ml/100g	P_{cm}				
	< 0,18	< 0,23	< 0,28	< 0,33	< 0,38
H1	A	B	C	D	E
H2	B	C	D	E	F
H3	C	D	E	F	G

3. táblázat: Az előmelegítési hőmérséklet meghatározása az indexcsoport és a lemezvastagság alapján

A minimális előmelegítési hőmérsékletet a lemezvastagság és az indexcsoport alapján táblázatokból lehet kiválasztani kis, közepes vagy pedig nagy alakváltozó képességű esetekre. A következő táblázat kis alakváltozó képességű esetre mutatja be az előmelegítési hőmérséklet meghatározásának módját.

lemezvas- tagság, mm	Javasolt minimális előmelegítési hőmérséklet, $T_p, ^\circ C$						
	A	B	C	D	E	F	G
< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	60	140	150
10-20			20	60	100		
20-38			20	80	110		
38-75	20	20	40	95	120		
> 75	20	20	40	95	120		

Az előzőekben felsorolt módszerek megfelelő alkalmazásához részleteiben ismerni kell a hivatkozott szabványokat. A felhasználók számára ugyanakkor egyre több

szoftver áll rendelkezésére, amellyel könnyen és gyorsan meg lehet határozni a hidegrepedés elkerüléséhez szükséges előmelegítési hőmérsékletet vagy a szükséges minimális fajlagos hőbevitelt. A cikk a fontosabb irodalmi hivatkozások áttekintésével kíván az alkalmazóknak segítséget nyújtani annak reményében, hogy az MSZ EN 1011-1 szabványt hamarosan követi a többi szabvány magyarra fordítása, kiadása és alkalmazása.

Felhasznált irodalom:

- [1] Hart P. H. M. - Pargetter R. J. - Wright M. D.: Vergleich der Methoden zur Festlegung der Schweißverfahren um Wasserstoffrisse in der Fertigung zu vermeiden - IIW Doc. IX-1602-90
- [2] Gáti, J. - Kovács, M.: **Kötéstechnológia**
Bánki Donát Műszaki Főiskola jegyzete, Bp.1999. 106. old.
- [3] Bödök, K.: Az ötvözetlen, gyengén és erősen ötvözött szerkezeti acélok korrózióállósága, különös tekintettel azok hegeszthetőségére
Corweld Kft. kiadványa - Bp., 1997.
- [4] De Wet, H.: Hegesztési varratok hidrogén okozta törékenysége
Hegesztéstechnika, XIV. évf. 2003. 3. sz. 50-52. old.
- [5] Balogh, A.: A vonalenergia számítása és szerepeltetése a WPS-ben
Hegesztéstechnika, XI. évf. 2000. 1. sz. 3-7. old.
- [6] Hegesztési zsebkönyv
Cokom Kft. Miskolc, 2003. 158-159. old.
- [7] Degenkolbe, J. - Uwer, D. - Wegmann, G.: Kennzeichnung von Schweißtemperaturzyklen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften von Schweißverbindungen durch die Abkühlzeit $t_{8/5}$ und deren Ermittlung.
Thyssen Technische Berichte, 1985. Heft 1. 57-73. old., ill. IIW Doc. IX-1336-84
- [8] Kovács, M.: Hegesztés
Tankönyvmester Kiadó, Bp. 2001. 134. old.
- [9] Uwer, D. - Höhne, H.: Charakterisierung des Kaltrißverhaltens von Stählen beim Schweißen - Schweißen und Schneiden. 43. évf. 1991. 4. sz. 195-199. old.
- [10] Uwer, D. - Höhne, H.: Ermittlung angemessener Mindestvorwärmtemperaturen für das kaltrißsichere Schweißen von Stählen.
Schweißen und Schneiden, 43. évf. 1991. 5. sz. 282-286. old.
ill. IIW Doc. IX-1631-91

- [11] Kovács, M.: Nagyszilárdságú finomszemcsés szerkezeti acélok hegesztése
Hegesztéstechnika, III. évf. 1992. 3. sz. 14-16.old.
- [12] Görbe, Z.: Hőfizikai jellemzők hőmérsékletfüggésének hatása a hegesztési
varratok hűlési idejére
Hegesztéstechnika, X. évf. 1999. 3. sz. 11-15.old.
- [13] Balogh, A. - Kirk, C. S. - Mileham, A. R.: A new heat flow model for medium size
plates - Gép, IL. évf. 1998. 6. sz. 20-25.old.
- [14] Ito, Y.-Bessyo, K.: Weldability formula of high strength steels, related to heat-
affected zone cracking.
Sumitomo Search, 1. évf. 1969. 5. sz. 59-70. old. ill. IIW-Doc. IX-631-69.

Ábraalírások

- 1. ábra:** Acélok repedési veszélyei hegesztéskor és hegesztés utáni hőkezeléskor
- 2. ábra:** A kihúzási viszony változása a d_e , Q és az „ a ” méret függvényében
- 3. ábra:** A kombinált vastagság értelmezése
- 4. ábra:** Az előmelegítési hőmérséklet meghatározása grafikon útján
- 5. ábra:** a) kétirányú; b) háromirányú hőelvezetés
- 6. ábra:** A hegyanyag mechanikai tulajdonságainak változása a $t_{8/5}$ függvényében