

Követelmények a mederhíd acélanyagával és hegesztett kötéseivel szemben

Karol Kálna*

Abstract

Required properties of steels and welded joints for bridge structure. The fatigue failure and the brittle fracture are the most important limit states of bridge steel structures. Resistance against the fatigue failure can be achieved by a selection of the suitable form of structure details and by a guarantee of the suitable quality of production, above all of the welding (minimization of not admissible defects-discontinuities as well as geometric imperfections). Resistance against the brittle fracture may be achieved by a selection of sufficiently tough materials, steels and weld metals. To determine requirements for the structural and weld material properties and the quality assurance respectively (see tables 4–8) there were taken into consideration the recommendations of adequate IIW documents, EN standards and our research and practical experiences.

Bevezetés

A híd acélszerkezetének tönkremeneteli határállapotát alapvetően a fáradásos károsodás és az ezt követő rideg törés jellemzi. A híd szerkezet fáradással szembeni ellenállása a szerkezet megfelelő kialakításával és gyártásának minőségbiztosításával érhető el. Vonatkozik ez főleg a hegesztési műveletekre (a meg nem engedett hibák minimalizálásával, a folytonossági hiányok és az alakhibák kiküszöbölésével). A rideg töréssel szemben megkívánt ellenállás az elegendően szívós acél és a hegesztő hozaganyagok megválasztásával érhető el.

A szerkezeti anyagok tulajdonságaival szembeni követelmények meghatározásánál fontosak a gazdasági szempontok, amelyek az acél és a hegesztő hozaganyagok árán kívül magukban foglalják a munkaigényes gyártás költségeit is (pl. a hegesztett kötés elkészítése és az ehhez szükséges előmelegítés, a varrat megmunkálása és javítása stb.).

Méretezés kifáradásra

Az acélszerkezet és részegységeinek tervezésekor az IIW Doc. XIII-1539-96/XV-845-96 [1] szerint kell kifáradásra méretezni. Ha a szerkezet valamely részegysége nem felel meg az előírásnak, akkor:

- a fáradás szempontjából előnyösebb alakra kell áttervezni,
- magasabb minőségfokozatú hegesztett kötésekkel kell előírni, pl. az EN 25 817, EN 1712, EN 12 517 szerint,
- elő kell írni a fáradási repedések keltkezése szempontjából veszélyeztetett varratok és átmenetek köszörléssel történő megmunkálását, vagy a hegesztési varrat átmenetének TIG - átolvasztását.

Méretezés rideg törésre

Acélszerkezetek tervezését és méretezését rideg törésre a különféle szabványok (API, ASME, BS, EN stb.) szigorú eljárásai szerint végzik. Lényeges eltérés a *fiktív repedés* a_F nagyságában van, amelynek mérete a megkövetelt *törési szívósság* – K_{IR} (MPa·√m) meghatározásához használt összefüggésben jelenik meg. A fiktív repedés egy hipotetikus meghibásodás, amely nem fordulhat elő a szerkezetben. Az a_F mérete függ a szerkezet gyártásának minőségétől, beleértve a hegesztés módját és a varratok roncsolásmentes vizsgálatának terjedelmét.

Az acélok és a hegesztett kötések K_{IR} törési szívósságának meghatározása

A törési szívósság meghatározására a módosított Landes-féle

összefüggést használtuk [2]. Az igénybevétel szintje – S2, a károsodás következményei – C2 és az igénybevétel módja főleg statikus az ENV 1993-1-1 eljárása szerint. A fiktív repedés a_F méretét az IIW Doc. X-1248-92 [3] javaslata szerint választottuk meg.

A szükséges (a megkövetelt) törési szívósság K_{IR} értékét a következő összefüggéssel lehet meghatározni:

$$K_{IR} = f_{yt} \sqrt{\pi \cdot a_F \cdot k_c \cdot k_F \cdot (2k_s - 1)} \quad (1)$$

amelyhez esetünkben $a_F = \{5 \text{ mm}; 0,2 \cdot t; 20 \text{ mm}\}$; $k_c = 1,5$; $k_F = 1,0$; $k_s = 2,0$ értékek tartoznak.

A $k_s = 2,0$ tényező használata jogos a nem hőkezelt varratokkal készült szerkezeti részegységeknél. Felvéve az anyag megbíhatósági tényezőjét $\gamma_M = 1,2$ értékre és a tompa varratok feszültség-gyűjtési tényezőjét $k = 1,2$ értékre, a hegesztett kötésekben a maradó feszültség: $\sigma_T = R_e = f_{yt}$ és így az eredő fiktív feszültség: $\sigma_T = 2 \cdot f_{yt}$.

Az acélhidakra érvényes BS 5400 brit szabványban [4] az UMIST-1997 javaslata alapján a statikusan és a fáradásra igénybe vett szerkezeteknél egyaránt azonos méretű fiktív repedéssel számoltak, mégpedig: $a_F = \{3 \text{ mm}; 0,15 \cdot t; 12 \text{ mm}\}$. A brit szakemberek ezt az UK-ban alkalmazott gyártási eljárás magasabb minőségével magyarázzák.

Az acélok és a hegesztett kötések megkövetelt K_{IR} ütőmunkájának meghatározása

A K_{IC} törési szívósság és a KV ütőmunka között nincs jó korreláció. A törési szívósság vizsgálatánál valós vastagságú, hosszú, éles, fáradásos repedéssel bemetszett próbatestet használnak; a terhelés lassú. Az ütőmunka vizsgálatához pedig kisméretű, 10x10 mm méretű, sekély, $a = 2 \text{ mm}$ mély és $r = 0,25 \text{ mm}$ lekerekítésű sugarú próbatestet. A szívósság-hőmérséklet: $K_{IC}(T)$ és $KV(T)$ összefüggések egymással szemben eltolódtak. A megfelelő KV (J) ütőmunka előzetes meghatározására a Sailors-Corten-féle összefüggés [5] használható:

$$K_{IC} = 14,5 \cdot \sqrt{KV} = C \sqrt{KV} \Rightarrow KV = (K_{IC} / V_1)^2 \quad (2)$$

A VÚZ – Hegesztési Kutatóintézet (Bratislava) szerint [6] az állandó értéke nagyobb lehet: $C_2 = 18$.

Az (1) összefüggéssel meghatározott K_{IR} törési szívósság és a (2) szerinti KV_R ütőmunka értékeit az 1. táblázatban tüntettük fel.

1. táblázat: Az anyagok megkövetelt törési szívóssága és ütőmunkája

Vastagság t (mm)	≤25	32	40	50	60
S355 – f_y (MPa)	345	345	345	335	335
K_{IR} (MPa·√m)	92	104	116	126	138
KV_R (J)	26÷40	33÷51	42÷64	49÷76	59÷91
S420 – f_y (MPa)	400	400	400	390	390
K_{IR} (MPa·√m)	106	120	134	147	161
KV_R (J)	35÷53	44÷68	55÷85	66÷102	80÷123
S460 – f_y (MPa)	440	440	440	430	430
K_{IR} (MPa·√m)	117	132	148	162	177
KV_R (J)	42÷65	54÷83	68÷104	81÷125	97÷149

Az EN szerinti szavatolt tulajdonságok

Szükséges, hogy az acélok jó hegeszthetők legyenek csekély előmelegítés mellett is és kellően szívóssak. Az adott feltételek mellett a legelőnyösebbek a finomszemcsés hegeszthető acélok az EN 10113-2 szerint normalizált állapotban: az S355NL és S420NL vagy az EN 10113-3 termomechanikusan hengerelt: S355ML és S420ML minőségjelűek.

* Doc. Ing. Karol Kálna, DrSc., Welding Research Institute - Industrial Institute SR, Bratislava, 832 59 Bratislava, Račianska 71

2. táblázat: Az acélok vegyi összetétele (kiválasztott elemek, öntési analízis, tömeg%) EN 10113-2 és 3 szerint

Acél	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ni	CEV
S355NL	0,18	0,50	0,90-1,65	0,030	0,025	0,05	0,12	0,50	0,43
S420NL	0,20	0,60	1,00-1,70	0,030	0,025	0,05	0,20	0,80	0,48
S460NL	0,20	0,60	1,00-1,70	0,030	0,025	0,05	0,20	0,80	-
S355ML	0,14	0,50	1,60	0,030	0,025	0,05	0,10	0,30	0,39
S420ML	0,16	0,50	1,70	0,030	0,025	0,05	0,12	0,30	0,45
S460ML	0,16	0,60	1,70	0,030	0,025	0,05	0,12	0,45	0,46

3. táblázat: Az acélok szilárdsági, alakváltozási és szívóssági tulajdonságai az EN 10113-2 és 3 szerint

Acél	R _m (MPa)	Re (MPa)			A5 %	KV (J)		KV (J)	
		l (mm) vastagság szerint				(hosszirányban)		(kereszt irányban)	
		≤16	→ 40	→ 63		-30 °C	-40 °C	-30 °C	-40 °C
S355NL	470-630	355	345	335	22	40	31	23	20
S420NL	520-680	420	400	390	19	40	31	23	20
S460NL	550-720	460	440	430	17	40	31	23	20
S355ML	450-610	355	345	335	22	40	31	23	20
S420ML	500-660	420	400	390	19	40	31	23	20
S460ML	530-720	460	440	430	17	40	31	23	20

Az acél EN 10113 szerint szavatolt szívóssága nem kielégítő. Némely elem mennyisége, amelyek a hegeszthetőséget befolyásolják, nagyon sok, úgyszintén a CEV szén ekvivalens is.

Az elismert acélművek szállítanak acéllemezeket és egyéb gyártmányokat előnyösebb vegyi összetétellel és szilárdsági tulajdonságokkal is. Az acélokkal szembeni előírt követelményeket tapasztalataink alapján határozzuk meg, konkrétan a vegyi összetételt és a szilárdsági tulajdonságokat, főleg az ütőszívósság értékéről kell az acélgyártó céggel meg egyezni.

Az acél megkövetelt tulajdonságai

A jó hegeszthetőség és a szükséges szívósság biztonságos eléréséhez az EN 10113 szerinti vegyi összetétel előírását kell betartani a 4. táblázati értékhatárok mellett:

4. táblázat: Az acél vegyi összetételére előírt értékhatárok (tömeg%)

Acél	EN	C %	Nb %	Nb+V+Ti %	CEV l ≤ 25 mm	CEV l=26-50 mm
S355NL	EN 10113-2	0,17	0,05	0,12	0,41	0,43
S420NL	EN 10113-2	0,19	0,05	0,12	0,43	0,45
S460NL	EN 10113-2	0,19	0,05	0,12	0,44	0,46
S355ML	EN 10113-3	0,14	0,05	0,12	0,38	0,41
S420ML	EN 10113-3	0,16	0,05	0,12	0,41	0,43
S460ML	EN 10113-3	0,16	0,05	0,12	0,42	0,44

Kéntartalom S < 0,010 %, foszfortartalom P < 0,020 %.

A szerkezeti acélok alapvető szilárdsági jellemzői felejenek meg az EN 10113-2 és -3 követelményeinek az alábbiak szerint:

a) A tényleges adatok (nem a szabvány) szerinti folyáshatár/szakítószilárdság arány: $R_f/R_m < 0,85$;

b) A hegyacélanyag megkövetelt szívóssága, a K_{IC} (MPa√m) törési szívósság és a KV (J) ütőmunka értékeit a T_S vizsgálati hőmérsékleten (átlagos érték / egy minimum) az 5. táblázatban foglaltuk össze.

5. táblázat: A KV (J) ütőmunka és a K_{IC} (MPa√m) törési szívósság megkövetelt értékei

Acél	A lemez mm vastagsága, mm	T _S °C	Acél: KV (J)		Heganyag*	
			Hossz-irányban	Kereszt-irányban	KV (J)	K_{IC}^* (MPa√m)
S355	l ≤ 25	-30	40/30	27/21	40/30	100
	26 - 50	-40	60/45	45/34	55/40	125
S420	l ≤ 25	-30	50/38	40/30	47/35	110
	26 - 50	-40	60/45	45/34	55/40	140
S460	l ≤ 25	-30	60/45	45/34	50/35	120
	26 - 50	-40	75/50	50/35	70/50	150

*) K_{IC} vagy $K_{0,2}$ a T_S hőmérsékleten a nemzeti szabvány vagy az ASTM E 813-89, ASTM E 1820-96 szerint. Legalább 6 db próbatestet kell vizsgálni, a számított értéket az adatok 90%-os valószínűségéhez rendelve kell meghatározni.

c) A vastagság irányában igénybevett lemezekre (fennáll a lamelláris károsodás veszélye):

- A szakadási kontrakció előírt értéke az EN 10 164 szerint: Z₂ > 35 % és emellett

- az ütőmunkájuk az EN 10045-1 szerint:

$$KV_Z \geq 40/30 J \quad T_S = -20 \text{ °C-on} \quad (5)$$

Az acélgyártmányok vizsgálatairól szóló dokumentumok tartalmát az EURONORM 168 (1998) írja elő.

Az előmelegítés hőmérsékletének megállapítása a hegesztésnél

Az előmelegítés hőmérséklete a hegesztésnél az EN 1011-2, C3. Melléklete szerint finomszemcsés, gyengén ötvözött acélokra lett meghatározva. A kiszámított T_p értékek ellenőrzöttek.

A szén-ekvivalensek CE (megegyeznek a CEV-vel) és a CET a következő összefüggésekkel adóttak:

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

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (7)$$

A CE és CET szén-ekvivalensek különböznek egymástól, nem lehet őket átszámítani (szükséges ismerni az acél valódi vegyi összetételét).

Az előmelegítés hőmérséklete a következő összefüggéssel határozható meg:

$$T_p = 697 \cdot (CET) + 160 \cdot tgh(t/35) + 62 \cdot (HD)^{0,35} + [53 \cdot (CET) - 32] \cdot Q - 328 \quad (8)$$

ahol t (mm) a hegesztett részek vastagsága

Q (kJ/mm) a hegesztés hőbevétele

HD a hegyanyag hidrogéntartalma (ml/100 g hegyanyag)

6. táblázat. Az előmelegítés hőmérsékletének kiszámított értékei, T_p (°C) hegesztésnél

Q KJ/mm	CET %	Karakterisztikus vastagság, t _g (mm)			
		20	30	40	50
1,20	0,25	45	74	93	105
	0,30	83	112	131	143
	0,34	113	142	161	173
2,0	0,25	30	59	78	90
	0,30	70	99	118	130
	0,34	102	131	150	162
2,05	0,25	21	49	69	81
	0,30	62	91	110	122
	0,34	95	124	143	155

Követelmények a hegesztéssel szemben

Heganyagok

A hegyanyagot a megkövetelt folyáshatára, szívóssága és diffúzió képes hidrogéntartalma alapján kell kiválasztani.

A hegyanyag folyáshatára és szakítószilárdsága nem lehet az acélénál számottevően nagyobb.

A hegyanyag R_c^w folyáshatára az acélanyagénál (R_c^s) legfeljebb 100 MPa-lal lehet nagyobb:

$$R_c^w = R_c^s + (1 \sim 100) MPa$$

$$R_m^w = (0,9 \sim 1,2) R_m^s \quad (9)$$

ahol R_c^w, R_m^w, R_c^s, R_m^s az anyagok tényleges jellemzői, nem pedig a szavatolt értékek.

A hegyanyag megkövetelt szívósságának megállapításánál a 5. táblázatban lévő adatok a mérvadók.

ságait valamint az előmelegítés hőmérsékletét a hegesztésnél. Ezért a hegesztéshez csak olyan hegyanyagok használhatók, amelyeknek a diffúzió képes hidrogéntartalma garantált.

7. táblázat: Az S355 és S420 acélokhoz javasolt hegyanyagok típusai

A hegesztés módja	Szabvány	l < 25 mm	t = 25–50 mm
MAW – 111	EN 499	E42 3B H10	E 42 5B H10
SAW – 121	EN 756	S42 3A B S2	S42 5AB S2
MAG – 135	EN 440	G42 3M G3 S11	G42 5M G3 S11
MAGT – 136	EN 758	T42 3 1Ni PM1	T42 5 1Ni PM1

A hegesztésre vonatkozó követelmények

a) Az acélszerkezet gyártója meg kell feleljen az EN 729-2 követelményeinek, jogosítvánnyal kell rendelkeznie a megfelelő nemzeti hatóságtól és teljesítenie kell az EN 719 követelményeit. Hegesztési az adott hegesztési eljárással csak az EN 287-1 szerint érvényes vizsgákkal bíró szakembereknek szabad. Az EN 288-2 és az EN ISO 15609-1 szerint megadott hegesztési eljárásokat (WPS) vizsgálatokkal kell ellenőrizni, minősíteni és jegyzőkönyvezni (WPQR) az EN 288-3 és az EN ISO 15614-1 szerint.

b) A mederhíd acélszerkezete gyártóinak be kell tartaniuk a meghatározott hegesztési hőreztimet: előmelegítés, hőbevitel, varratközi hőmérséklet, utóhőkezelés. A gyártóknak garantálni kell a hegyanyag megkövetelt tulajdonságait: a relatív folyáshatárt a (9) szerint, szívósságot: KV (J) és $K_{CJ} (MPa\sqrt{m})$ az 5. táblázat szerint. Vitatott esetekben a K_{CJ} törési szívósság dönt.

c) A hegesztés elkezdése előtt a gyártóknak el kell végezniük minden alkalmazott hegesztési eljárással és jellemző anyagvastagsággal (pl. t = 16 – 28 – 50 mm). készített hegesztett kötések próbatetszjeit (MAW 111, SAW – 121, MAG – 135, MAGT – 136). A következő vizsgálatokat és elemzéseket kell elvégezni:

- Az acél és a hegyanyag vegyi elemzése,
- A hegesztett kötés makrostruktúrájának vizsgálata,
- A hegesztett kötés keménységének vizsgálata, HV 10,
- A hegesztett kötés szakítóvizsgálata az EN 895 és a hegyanyag vizsgálata az EN 876 szerint,
- Az acél, a hegyanyag és hegesztés átmeneti zónájának ütő-hajlító vizsgálata, a KV meghatározása az E 875 szerint -30°C-on,
- Törési szívósság, K_{CJ} vagy $K_{0,2}$ meghatározása a teljes anyagvastagságú mintákkal -30°C-on.

A hegesztett kötések megállapított jellemzőit archiválják, hogy felhasználhatók legyenek a szerkezet kezdeti és időszakos vizsgálatok feltárt anyaghiányok veszélyességének a megítélésére a „megfelelőség az üzemben tartásra” módszerrel a híd élettartalma folyamán.

d) Az acélszerkezet gyártóinak lehetővé kell tenni a beruházónak vagy az általa megbízott szervezetnek a hegesztés minőségének ellenőrzését a gyártás és a szerelés minden szakaszában. Az ellenőrök kérésére a hegesztett kötésből próbatetet kell készíteniük az NDT és mechanikai vizsgálatokhoz.

e) A hibás hegesztések kijavítására külön hegesztési technológiát – WPS – kell kidolgozni.

Roncsolásmentes varratvizsgálat

A hegesztett kötések megkövetelt minőségét az EN 25817, B minőségi fokozata szerint ellenőrzik. A vizsgálat terjedelmét és módját a tervező határozza meg a statikus és fáradási igénybevétel figyelembevételével. A roncsolásmentes vizsgálatokat (NDT) a megfelelő EN szabványok szerint kell elvégezni (lásd a 8. táblázatot).

8. táblázat. A varratok roncsolásmentes vizsgálata és a megkövetelt minőség szintje

A vizsgálat módszere	A vizsgálat módja	Jellemző	A minőség szintje
Szemrevételezés (VT)	EN 970	-	EN 25817-B
Rádiográfiai (RT)	EN 1435 tr. B	EN 12517	EN 12517-ú.2
Ultraszónus (UT)	EN 1714 tr. B	EN 1713	EN 1712-ú.2
Penetrációs (PT)	EN 571-1	EN 1289	EN 1289-ú.1
Mágneseshelő poros (MT)	EN 1290	EN 1291	EN 1291-ú.1

Különös figyelmet kell szentelni a hegesztett kötés alakhibáinak: a túl magas varratdomborulatra (az ISO 6520 502 és 503 sz.), amelynek a meredeksége (505) $\alpha \geq 120^\circ$ kell legyen.

A roncsolásmentes vizsgálatokat csak a megfelelő vizsgálatra érvényes vizsgákkal rendelkező szakemberek végezhetik.

A hegesztett kötések vizsgálata a mederhíd gyártásakor

Tekintettel a hegesztési munkák nagy terjedelmére és a mederhíd acélszerkezete gyártásának időigényére, a szerkezet gyártása közben is szükséges a hegesztés minőségét és a hegesztett kötések megkövetelt tulajdonságait ellenőrizni és igazolni. A gyártás közbeni vizsgálatok terjedelme kötődik a gyártás előtti vizsgálat programjához, a hid tender dokumentációjához.

A varratok próbamintáit a szerkezet tényleges varrainak a folytatásából kellene kivenni. Ha ez nem lehetséges, akkor a próbahegesztés lemezei legyenek kellően nagyok, hogy modellezzék a hegesztés valós hőelvezetési viszonyait.

A gyártásközi vizsgálatok terjedelménél figyelembe kell venni az időtényezőt (pl. 3 hónapoként), úgyszintén az elkészített varratok hosszát (pl. 1000 m). Javasolható a szerkezeti acél lemezanyag vastagság irányú tulajdonságainak a vizsgálata is.

Általános követelmények a szerkezet részegységeinek tervezéséhez

A fáradásos károsodás és ezt követően a rideg törés veszélyének csökkentése érdekében különös figyelmet kell fordítani az alapvető szerkezeti részek megtervezésére. A fő alapelvek a következők:

- a) Előnybe kell részesíteni a kétoldali tompavarratok használatát a más típusú kötésekkel szemben.
- b) Az egyoldali kötés alkalmazásának szüksége esetén ne használjunk acél alátétes kötések; alátét nélküli kötetet kell alkalmazni, a varrat gyökét ki kell köszörülni és varrattal feltölteni.
- c) T kötés esetében az áthegesztett gyökkel készült K varratot kell előnybe részesíteni a sarokvarratok helyett. A sarokvarratokat a merevítőbordák hozzáhegesztéséhez használjuk.
- d) A tompa varratokat a gernicektől és merevítőbordáktól megfelelő távolságban úgy kell elhelyezni, hogy a roncsolásmentes vizsgálatokat el lehessen végezni (beleértve az ultrahangos vizsgálatot is).
- e) Keresztkötések esetében a jobban igénybevett lemezek maradjanak egyben, a kevésbé terhelteket kell hozzáhegesztetni.
- f) Kerülni kell a merev csomópontokat, mert kedveznek a varratrepedések és a lamelláris felszakadások keletkezésének.
- g) Három, egymásra merőleges lemez kapcsolatánál a merevítők sarkait ki kell vágni, a lekerekítés sugara $r \geq (25 \text{ mm} + \text{lemezvastagság})$, lásd az EN 1708-2 „Hegesztés. Alapvető kötési módok az acélok hegesztésénél 2. rész: Acélszerkezetek”.

A mederhíd próbaterhelése

A mederhíd acélszerkezetének próbaterhelésekor az acélelemek hőmérséklete nem lehet +10°C-nál kisebb hőmérsékletű.

Hivatkozások

- [1] Hobbacher, A. (1996): Recommendation for fatigue design of welded joints and components. IIW Doc. XIII-1539-96/XV-845-96.
- [2] Begley, J. A. – Landes, J. D. (1972): The J-integral as a fracture criterion, ASTM STP 514, 1-20.
- [3] Burdakin, F. M. (1992): Proposal for collaborative programme for material selection for welded structural steelwork. IIW Doc. X-1248-92.
- [4] BS 5400-6 Steel, concrete and composite bridges. Specification for materials and workmanship. Steel.
- [5] Sailors, R. H. – Corten, H. T. (1973): Relationship between material fracture toughness using fracture mechanics and transition temperature tests, ASTM STP 514, 164.
- [6] Kálna, K. – Hamák, I. (1999): A S420 és S460 acélok hegesztett kötéseinél ridegtörés jellemzői (szlovákul) Zvaranie – Svařování, 48, 3, 56.