

LEMEZBORDÁS LEMEZ FÁRADÁS VIZSGÁLATA ÉS OPTIMÁLÁSA

FATIGUE DESIGN AND OPTIMIZATION OF FLAT STIFFENED PLATES

Virág Zoltán PhD, Jármai Károly DSc
Miskolci Egyetem

ABSTRACT

In this overview of compressed stiffened plates various fatigue designs and welding types are investigated. The unknowns are the thickness of the base plate as well as the dimensions and number of stiffeners. The cost function to be minimized are three kinds of fabrication costs.

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben több olyan dolog megváltozott, mely a hegesztett szerkezetek kialakítására nagy hatással van. Új anyagok és új hegesztési technológiák jelennek meg, illetve terjednek el. Ezért fontos a szerkezetek költség optimalizálása a különböző lehetőségekre [1,2]. A tervezési előírások jelentősen finomodtak. Különösen igaz ez a dinamikus igénybevételre, a fáradásra. A különféle kutató intézetekben, egyetemeken, ipari laboratóriumokban nagyszámú fásasztó kísérletet végezve pontosabban megközelítették a szerkezet viselkedését. Javultak a fásasztó berendezések is, nagyobb ciklusszámú vizsgálatot téve lehetővé.

2. HEGESZTETT KÖTÉSEK FÁRADÁSÁT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

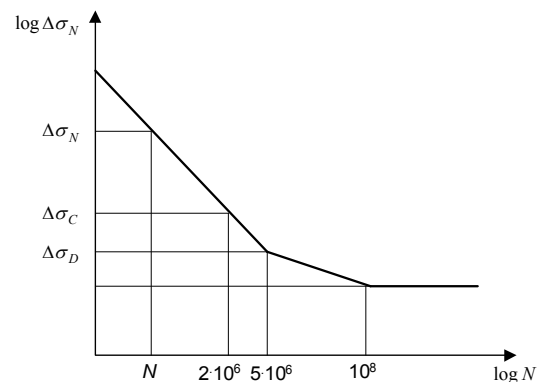
A varratméretezésnél a több tényezőt fontos figyelembe venni. Az alkalmazott alapanyag leggyakrabban acél; a hegesztési technológia, ahol a legelterjedtebb az aktív védőgázos fagyóelektródás hegesztés, de a bevontelektródás kézi ívhegesztés, illetve a fedettívű (és több más) hegesztés is használatos; a hegesztési maradó feszültségek, melyek a bevitt hőtől, a szerkezet és a varrat méreteitől függenek; a kötés típusa, amely a méretezésnél a fáradási kategóriát megadja; a varrat geometria, amely még javítható hegesztési utókezeléssel; figyelembe kell venni a hegesztési hibákat; a feszültség-tartomány a fáradási élettartamot legjobban befolyásoló tényező; a ciklusszám szintén domináló tényező. A jelenlegi fáradási viselkedési leírások szerint csak $N = 10^8$, vagy 10^9 ciklusszám után lehet a $\Delta\sigma - N$ görbénél a fáradási értéket változatlanul tekinteni; a feszültség-

állapot, az esetek nagy részében nemcsak normál-feszültség, de nyírófeszültség is adódik.

A fáradási viselkedés jelentősen változik, illetve változhat ezen tényezők változásával.

3. FÁRADÁSI TERVEZÉSI ELŐÍRÁSOK AZ EUROCODE 3 ALAPJÁN

Az Eurocode 3 [3] szabvány, továbbiakban EC3, a hegesztett kötések osztályba sorolja. Az osztály száma $\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$ jelenti a fáradási feszültség-tartományt MPa-ban $N = 2 \cdot 10^6$ ciklus esetén. N ciklusszám esetén a fáradási feszültség-tartomány értékei $\Delta\sigma_N, \Delta\tau_N$ grafikusan vannak megadva (egyenes vonalak a log-log koordináta rendszerben, 1. ábra). A szabvány megfelelő ábráján párhuzamos vonalak jelölik 36-160 MPa-ig a különböző osztályokat.



1. ábra. Normál-feszültség fáradási határértékek a ciklusszám függvényében

Az 1. ábra csak egy vonalat ad meg, de a számítás bármely ide tartozó osztálynál ugyanúgy történik. Ennek megfelelően $\Delta\sigma_N, \Delta\tau_N$ értékei lineáris interpolációval meghatározhatók (1) és (2) képletek szerint, ha ismerjük a $\Delta\sigma_C$ -t, m és N értékét. Az N ciklusszám 10^5 és végtelen között változhat. Normál-feszültség fáradási határértékek ciklusszám függők.

Ha $N \leq 5 \cdot 10^6$, akkor

$$\log \Delta \sigma_N = \frac{1}{m} \log \frac{2 \cdot 10^6}{N} + \log \Delta \sigma_C \quad (1)$$

ahol m a görbe meredeksége állandó, $m = 3$, $\Delta \sigma_C$ a fáradási feszültség-tartomány $N=2 \cdot 10^6$ ciklusszám esetén, ez megegyezik a kötés csoportba sorolási számával (36-160 MPa közötti).

Ha $5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^8$, akkor

$$\log \Delta \sigma_N = \frac{1}{m} \log \frac{5 \cdot 10^6}{N} + \log \Delta \sigma_D \quad (2)$$

ahol a görbe meredeksége kisebb, $m = 5$, $\Delta \sigma_D$ a fáradási feszültség-tartomány $N=5 \cdot 10^6$ ciklusszám esetén (meghatározható $\Delta \sigma_C$ értékéből). Az EC3 szabvány interakciós formulája összetett igénybevétel esetén, ahol $\Delta \sigma, \Delta \tau$ a normál és a nyírófeszültség tervezési értékei, $\Delta \sigma_N, \Delta \tau_N$ a fáradási feszültség-amplitudók, γ_{Ff} és γ_{Mf} részbiztonsági tényezők a fáradási terhekhez és a fáradási szilárdságokhoz.

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma}{\Delta \sigma_N / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta \tau}{\Delta \tau_N / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1 \quad (3)$$

Az ENV 1991 Eurocode 1-ben található fárasztóterhek már tartalmazzák a γ_{Ff} biztonsági tényező megfelelő értékét. γ_{Ff} értékét általában 1-nek veszik.

A fáradási feszültség-amplitúdóra a részbiztonsági tényező γ_{Mf} értéke a 1. táblázatban kerül megadásra.

„Törésbiztos elem” az, melynek lokális tönkremenetele nem eredményezi a teljes szerkezet tönkremenetelét. „Nem törésbiztos elem” az, melynek tönkremenetele a teljes szerkezet tönkremenetelét okozza (1. táblázat). A számítási példában 1.25-ös értékkel számolunk.

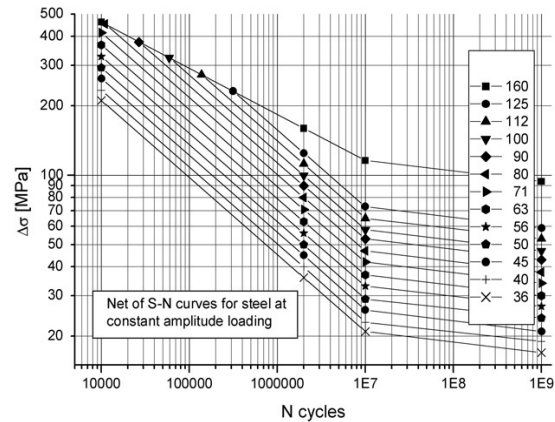
1. táblázat. A részbiztonsági tényező γ_{Mf} értéke az EC3 szabvány szerint

	törésbiztos elem	nem törésbiztos elem
megközelíthető kapcsolat	1.00	1.25
nehezen elérhető kapcsolat	1.15	1.35

4. FÁRADÁSI TERVEZÉSI ELŐÍRÁSOK A NEMZETKÖZI HEGESZTÉSI INTÉZET AJÁNLÁSA ALAPJÁN

A Nemzetközi Hegesztési Intézet (International Institute of Welding) ajánlást dolgozott ki hegesztett kapcsolatok fáradásának meghatározására [4]. Az ajánlás előnye,

hogy felhasznál újabb kutatási eredményeket. 960 MPa folyáshatárig érvényes az Eurocode 690 MPa folyáshatárhoz képest. A fáradási határokat nemcsak acélra, hanem alumíniumra is megadja. A fáradási határ 10^9 ciklusszám fölött válik állandóvá normál (2. ábra).



2. ábra. IIW ajánlás fáradási görbék normál feszültségre

Ha $N \leq 10^7$, akkor

$$\log \Delta \sigma_N = \frac{1}{m} \log \frac{2 \cdot 10^6}{N} + \log \Delta \sigma_C \quad (4)$$

ahol m a görbe meredeksége állandó, $m = 3$, $\Delta \sigma_C$ a fáradási feszültség-tartomány $N=2 \cdot 10^6$ ciklusszám esetén, ez megegyezik a kötés csoportba sorolási számával (36-160 MPa közötti).

Ha $10^7 \leq N$, akkor

$$\log \Delta \sigma_N = \frac{1}{m} \log \frac{10^7}{N} + \log \Delta \sigma_D \quad (5)$$

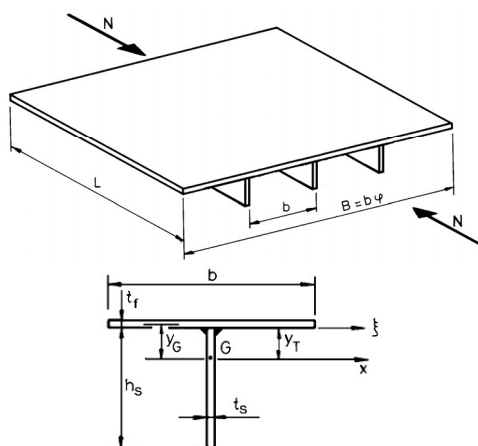
ahol a görbe meredeksége kisebb, $m = 5$, $\Delta \sigma_D$ a fáradási feszültség-tartomány $N=10^7$ ciklusszám esetén (meghatározható $\Delta \sigma_C$ értékéből).

4. SZÁMPÉLDA LEMEZBORDÁS LEMEZ FÁRADÁSI VIZSGÁLATÁRA

Megadott adatok: $B = 6000$ mm, $L = 4000$ mm, $N = 1.2 \cdot 10^7$ [N], $f_y = 235$ MPa, $E = 2.1 \cdot 10^5$ MPa, $G = E/2.6$, $\rho = 7.85 \cdot 10^{-6}$ kg/mm³, $\Theta_d = 3$. A számított fáradási ciklusszámok: 10^5 , 10^6 , 10^7 , 10^8 . A vastagságokra felső határokat adtunk meg, a fedőlemez vastagságra (t_f) 40 mm, a borda vastagságra (t_s) 30 mm. A bordaközök száma (φ) maximum 30 lehet. A változók: φ , t_f , t_s . (4. ábra)

Vizsgálatok három hegesztési eljárásra lettek elvégezve: kézi hegesztés (SMAW), kevert védőgázos félautomati-

kus hegesztés (GMAW-M) és poralatti automatikus hegesztés (SAW).



4. ábra. A hosszirányban terhelt bordás lemez és a lemezborða geometriája

A fáradási feltétel az EC3 szabvány és IIW ajánlás alapján lett számítva. A különböző hegesztési eljárások különböző fáradási hegesztési tartományba sorolhatók a 2. táblázat adatai szerint. A méretezés további feltételei a teljes bordázott lemez horpadása, a fedőlemez horpadása és a bordák elcsavarodó kihajlása Mikami módszerével [5] korábbi tanulmányokban már részletezve lettek.

2. táblázat. Hegesztési eljárások besorolása

Hegesztési módszer	EC3	IIW
	$\Delta\sigma_C$ [MPa]	$\Delta\sigma_C$ [MPa]
SMAW	100	90
GMAW-CO ₂	112	100
SAW	125	125

Ez a célfüggvény az anyagfüggvény és az előállítási költség összegeként számolható

$$K = K_m + K_f = k_m \rho V + k_f \sum T_i \quad (6)$$

$$\frac{K}{k_m} = \rho V + \frac{k_f}{k_m} (T_1 + T_2 + T_3) \quad [kg] \quad (7)$$

ahol ρ az alapanyag sűrűség, V a szerkezet térfogata, K_m és K_f valamint k_m és k_f anyag és előállítási költségek és tényezők, T_i előállítási idők a következők szerint:
- összeszerelési és összefűzési idő

$$T_1 = \Theta_d \sqrt{\kappa \rho V} \quad (8)$$

ahol Θ_d a hegesztett szerkezet bonyolultsági tényezője, κ a szerkezet összeszerelendő részeinek száma;
- T_2 hegesztési idő, és T_3 a járulékos idők, mint például elektróda csere. $T_3 \approx 0.3T_2$

$$T_2 + T_3 = 1.3 \sum C_{2i} a_{wi}^n L_{wi} \quad (9)$$

ahol L_{wi} a varrathossz, $C_{2i} a_{wi}^n$ értéke a COSTCOMP [6] software által rajzolt függvényből kapható meg hegesztési eljárásokra, a_w a varratméret (3. táblázat).

3. táblázat. Hegesztési idők a varrat méret a_w [mm] függvényében hosszirányú sarokvarratra

Hegesztési módszer	a_w [mm]	$10^3 C_2 a_w^n$
SMAW	0-15	$0.7889 a_w^2$
GMAW-CO ₂	0-15	$0.3258 a_w^2$
SAW	0-15	$0.2349 a_w^2$

5. EREDMÉNYEK

Az eredmények három technológiára kerültek meghatározásra, fáradás nélkül, valamint 10^5 - 10^8 ciklusszám esetén, a EC3 szabvány szerint és az IIW ajánlása alapján számított értékek (4-6. táblázatok).

4. táblázat. Eredmények SMAW-ra

SMAW	k_f/k_m	t_f	t_s	φ	K/k_m
Fáradás nélkül	0	5	10	29	2172
	1	17	14	5	5555
	2	17	14	5	7562
EC3 10^5	0	5	10	29	2172
	1	17	14	5	5555
	2	17	14	5	7562
EC3 10^6	0	11	16	24	4660
	1	24	14	4	6400
	2	24	14	4	8021
EC3 10^7	0	26	15	26	7371
	1	39	11	4	8771
	2	39	11	4	10036
EC3 10^8	0	31	23	26	11654
	1	40	28	13	32137
	2	40	28	13	52603
IIW 10^5	0	5	10	29	2172
	1	17	14	5	5555
	2	17	14	5	7562
IIW 10^6	0	10	19	16	4264
	1	21	14	4	5810
	2	21	14	4	7406
IIW 10^7	0	10	24	29	8973
	1	40	29	5	16551
	2	40	29	5	24088

SMAW	k_f/k_m	t_f	t_s	φ	K/k_m
IIW 10^8	0	40	29	19	14190
	1	40	29	19	46798
	2	40	30	18	80066

5. táblázat. *Eredmények GMAW-ra*

GMAW	k_f/k_m	t_f	t_s	φ	K/k_m
Fáradás nélkül	0	5	10	29	2172
	1	11	12	10	4227
	2	15	13	6	5460
EC3 10^5	0	5	10	29	2172
	1	11	12	10	4227
	2	15	13	6	5460
EC3 10^6	0	16	16	11	4139
	1	21	14	4	5102
	2	21	14	4	5990
EC3 10^7	0	6	21	29	6558
	1	34	12	4	7449
	2	34	12	4	8301
EC3 10^8	0	40	21	16	10443
	1	40	29	9	17114
	2	40	29	9	23735
IIW 10^5	0	5	10	29	2172
	1	11	12	10	4227
	2	15	13	6	5460
IIW 10^6	0	18	13	6	3762
	1	19	14	4	4707
	2	19	14	4	5577
IIW 10^7	0	7	23	30	8063
	1	40	20	4	9618
	2	40	20	4	11174
IIW 10^8	0	17	28	29	12852
	1	40	24	22	24694
	2	39	30	15	36870

6. táblázat. *Eredmények SAW-ra*

SAW	k_f/k_m	t_f	t_s	φ	K/k_m
Fáradás nélkül	0	5	10	29	2172
	1	11	12	10	3921
	2	15	13	6	5060
EC3 10^5	0	5	10	29	2172
	1	11	12	10	3921
	2	15	13	6	5060
EC3 10^6	0	15	9	28	3787
	1	19	14	4	4568
	2	19	14	4	5299
EC3 10^7	0	30	13	4	5874
	1	30	13	4	6644
	2	30	13	4	7413
EC3 10^8	0	40	17	15	9314
	1	40	26	7	12562
	2	40	26	7	15805
IIW 10^5	0	5	10	29	2172
	1	11	12	10	3921
	2	15	13	6	5060
IIW 10^6	0	8	11	29	2996
	1	15	13	6	4129
	2	15	13	6	5060

SAW	k_f/k_m	t_f	t_s	φ	K/k_m
IIW 10^7	0	6	22	26	6449
	1	34	12	4	7346
	2	34	12	4	8097
IIW 10^8	0	39	27	10	10231
	1	40	30	8	15014
	2	40	30	8	19723

Az eredmények azt mutatják, milyen nagy a hatása a fáradási ciklusszámnak az eredményekre. A lemezméretek és a bordaszám is jelentősen növekednek, ahogy megy felfelé a ciklusszám. A fáradási feltétel 10^6 ciklusszám esetén már aktív lesz. A tömegminimumnál nagy bordaszámra törekszik a program. A költségminimumnál csak akkor növeli nagyra a bordaszámot, amikor már nem tudja a fedőlemezt és a bordákat tovább vastagítani. Összefoglalva érdemes mind a technológiát, mind a költségeket figyelembe venni a tervezéskor és ezekre optimalni.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány/kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként - az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében - az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. A kutatást az OTKA támogatta a T 75678 számú projekt keretében.

IRODALOM

- [1] Jármái, K., Iványi, M.: Gazdaságos fémszerkezetek analízise és tervezése, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 226 o., ISBN 963 420 674 3, 2001.
- [2] Virág, Z.: Optimum design of stiffened plates, Polack Periodica, Vol. 1, No. 1, pp. 77-92, HU ISSN 1748-1994, 2006.
- [3] Eurocode 3: MSZ ENV 1993-1-1:1992/A2:2002 Acélszerkezetek tervezése, 347 old. Magyar Szabványügyi Testület, Budapest, 2006.
- [4] Recommendations on fatigue of welded components of the IIW, Doc. IIW-1823-07, ex. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07, 2008.
- [5] Mikami, I., Niwa, K. Ultimate compressive strength of orthogonally stiffened steel plates. J. Structural Engineering ASCE 122, No.6. 674-682, 1996.
- [6] COSTCOMP Programm zur Berechnung der Schweisskosten. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf, 1990.