

FÁRADÁSOS REPEDÉSTERJEDÉSRE ÉRVÉNYES TERVEZÉSI GÖRBÉK HEGESZTETT SZERKEZETEK INTEGRITÁSÁNAK MEGÍTÉLÉSÉHEZ FATIGUE CRACK PROPAGATION DESIGN CURVES FOR INTEGRITY ASSESSMENT OF WELDED STRUCTURES

LUKÁCS JÁNOS

Kulcsszavak: fáradásos repedésterjedés, tervezési görbék, hegesztett szerkezetek, integritás
Keywords: fatigue crack propagation, design curves, welded structures, integrity

ABSTRACT

There are different standards and prescriptions containing fatigue crack propagation design or limit curves and rules for the prediction of the crack growth. The research work and the publication aimed to investigate of the fatigue crack growth resistance of different steels and their welded joints, and to determine fatigue crack propagation design curves for different structural steels and high strength steels, which have ever-growing role, furthermore their welded joints, characteristically under mode I loading condition.

ÖSSZEFOGLALÁS

A különböző szabványok és előírások tartalmaznak tervezési vagy határgörbéket fáradásos repedésterjedésre és útmutatásokat azok alkalmazására. A közlemény, illetve a kutató munka célja kettős, egyrészt különböző acélok és hegesztett kötéseik fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállásának meghatározása; másrészt tervezési görbék származtatása különböző szerkezeti acélokhhoz, valamint az egyre nagyobb szerephez jutó nagyszilárdságú acélokhhoz és hegesztett kötéseikhez, jellemzően I terhelésmódban.

1. BEVEZETÉS

A gépészeti szerkezetek számottevő hányadát napjainkban is jellemzően mechanikai igénybevételre, legtöbbször folyáshatárra méretezik, gyakorlati nem pusztán statikus terhelések esetén is. Ez általában a valós mechanikai terhelések – és nem ritkán a terhelési történet – jelentős egyszerűsítésével jár együtt, ami az adott szerkezet megbízhatóságát veszélyeztetheti. Az ismétlődő igénybevételű szerkezetek, különösen a hegesztett szerkezetek esetében a fáradásos törés bekövetkezésének gyakorisága meghaladja a statikus törését, így e szerkezetek méretezése más koncepciót kíván. A klasszikus, Wöhler-görbén (S-N görbén) alapuló módszerek nem törekednek a károsodás, a tönkremeneteli folyamat (időbeni) követésére, hanem

megengedett feszültségekkel számolnak. E feszültségek valamilyen törési (túlélési) valószínűséghez tartoznak, valamilyen kockázatvállalást tehát tükröznek, a szerkezetben lévő gyártási eredetű és/vagy az üzemeltetés során keletkező eltérések/hibák figyelembevételére azonban nem alkalmasak. Ez indokolta a törésmechanikai szemléletmód előterbe kerülését a legkülönbözőbb szerkezetek esetében.

A törésmechanika célkitűzése hármas: egyrészt törési kritériumok megfogalmazása és megalkotása (definiálása); másrészt anyagjellemzők és anyagi mérőszámok értelmezése és meghatározása (megmérése) a törési kritériumok alkalmazhatóságához; harmadrészt pedig a törési kritériumok (gyakorlati) alkalmazása repedéseket, illetve repedésszerű hibákat tartalmazó szerkezetekhez, szerkezeti elemekhez.

A törésmechanika gyakorlati alkalmazásához három szakmai terület összhangja szükséges: valorizált számítási módszerek kellenek, amelyek kellő referenciákkal rendelkeznek; roncsolásmentes vizsgálatokra van szükség, amelyekkel szemben követelmény az eltérések/hibák valós méretének megadása; és ismerni kell a mértékadó törésmechanikai anyagjellemzőket, anyagi mérőszámokat, amelyek a számításhoz nélkülözhetetlenek [1]. A törésmechanikai vizsgálatok, hasonlóan a fárasztóvizsgálatokhoz, az acélok átvételi vizsgálatai között – egy-két kivételtől eltekintve – napjainkban még nem szerepelnek, így természetes törekvése a gyártóknak az ilyen vizsgálati eredmények katalógusokban, gyártmányismertetőikben való közlése (például [2]).

A fáradásra való méretezésnek alapvetően két koncepciója ismeretes [3, 4, 5]. Az egyik, a biztos élettartamra való méretezés, azt feltételezi, hogy a szerkezet, szerkezeti elem anyagfolytonossági hiányoktól mentes, illetve ha mégis tartalmaz hiányokat, akkor azokból az alkalmazott igénybevételi szinten terjedő repedés nem keletkezik. Ez azt jelenti, hogy a méretezéskor figyelembe vett körülmények között katasztrofális törés nem következik be és a szerkezeti elem cseréjére sem kerül sor a tervezett élettartam lejárta előtt. A másik koncepció, a sérülésbiztos méretezés, azon a felfogáson alapul, hogy az egyes szerkezetekben

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar,
Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézet, 3515 Miskolc-
,Egyetemváros
janos.lukacs@uni-miskolc.hu
A 27. Hegesztési konferencián elhangzott előadás írásos változata

vannak anyagfolytonossági hiányok (repedések), és ezek növekednek. Ezen elv szerint a szerkezetnek a hiba felfedezéséig, pontosabban a hiba sorsáról való döntés meghozatalát követő cselekvésig, viselnie kell a terhelést. Utóbbi méretezési filozófia előtérbe kerülését, alkalmazásának szükségességét az alábbiak támasztják alá:

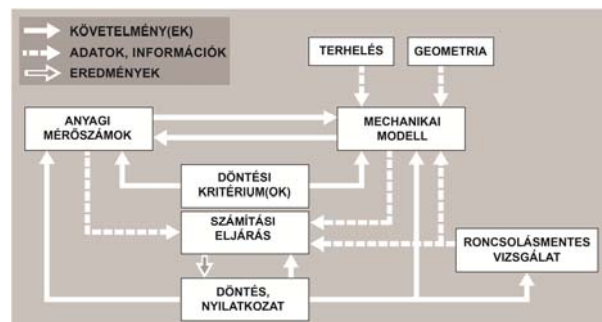
- a biztos élettartamra való méretezés koncepciója sokszor bizonyult elégtelennek, amit a gyakorlatban előfordult sajnálatos káresetek igazolnak [6, 7];
- a maximális tervezési (minimális fáradási) élettartam elérésekor végrehajtott szerkezeti elem csere esetén jelentős fel nem használt élettartam is elveszhet [4], ami az alkatrészek mind teljesebb kihasználására irányuló törekvéseknek mond ellent;
- a gépészeti szerkezetek folytonossági hiányoktól mentes gyártása csak elvben garantálható, ráadásul a különböző hibák nem mutathatók ki 100%-os megbízhatósággal [8];
- egyre erősebb az a gazdaságossági igény, hogy az észlelt hiba esetén ne annak javítása legyen az első gondolat, hiszen a hiba veszélyességének megítélése nélkül elvégzett javítás indokolatlan és gazdaságtalan lehet [9].

A különböző szerkezeteket meghatározott élettartamra tervezik, ugyanakkor a nehezen, vagy egyáltalán nem megszüntethető szerkezetek és/vagy anyagi okok esetében számolni kell a tervezett élettartamon túli üzemeltetéssel is (élettartam kiterjesztés, üzemidő hosszabbítás). Ilyen esetekben fel kell készülni arra, hogy a szerkezetek anyagának tulajdonságai kedvezőtlenül változnak meg, valamint arra, hogy a szerkezetben lévő eltérések/hibák növekednek és újak is keletkeznek [10].

Egy ismétlődő igénybevételű szerkezet, szerkezeti elem fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállásának megítélésére a tervezés vagy az üzemeltetés során kerülhet sor. Előbbi esetben feltételezett, utóbbi esetben pedig valamilyen roncsolásmentes vizsgálattal kimutatott repedés, repedésszerű hiba veszélyességéről kell nyilatkozni. A felvetődő kérdések megválaszolására alkalmas rendszer két alappillére, az anyagot reprezentáló mérőszámokra és a szerkezetet, szerkezeti elemet, különösen a repedés környezetében megtestesítő mechanikai modellre támaszkodik [3, 11]. E mellett figyelembe kell venni az alkalmazni kívánt, illetve alkalmazott roncsolásmentes vizsgálat megbízhatóságát, a hibák kimutathatóságát stb. is [8, 12].

A rendszer elvi vázlatát és egyes elemeinek kapcsolatát az 1. ábra [13] szemlélteti; működőképességének pedig alapfeltétele, hogy elemei között valamelyik törésmechanikai elméleten nyugvó kapcsolat, összhang legyen. Ez az elmélet leggyakrabban a lineárisan rugalmas törésmecha-

nika (*LRTM*) elmélete, a feszültségállapot leírására a repedéscsúcs környezetében pedig a feszültségintenzitási tényező tartományát (ΔK) használják [14, 15].



1. ábra. Az élettartam gazdálkodás rendszerének felépítése [13]

Ennek megfelelően az anyagi mérőszámok a fáradásos repedésterjedés kinetikai diagramjából származtathatók [16, 17], amely fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredménye. A megbízható alkalmazás érdekében kívánatos és szükséges, hogy ne egyedi eredményeket használjunk, hanem vizsgálatsorozatokból, matematikai-statisztikai módszerekkel származtatott tervezési határgörbéket. Az ilyen törekvés a törésmechanika gyakorlati alkalmazásának több területén is teret nyert már (például [18, 19]).

A fáradásos repedésterjedésre érvényes határgörbék és a számítások (az értékelések) háttérben két alapvető elem áll, egyrészt a fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredményeinek statisztikai feldolgozása, másrészt a repedésterjedést leíró valamilyen összefüggés, leggyakrabban a Paris-Erdogan összefüggés [20]:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \quad (1)$$

ahol da/dN a fáradásos repedésterjedési sebesség, ΔK a feszültségintenzitási tényező tartománya, C és n pedig állandók.

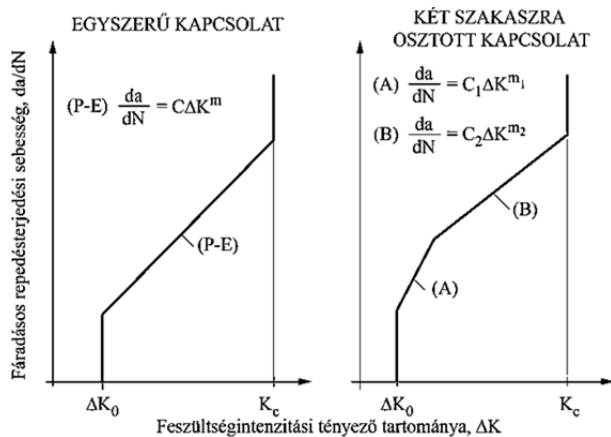
A közlemény, illetve a kutató munka célja mindezek után kettős, egyrészt különböző acélok és hegesztett kötéseik fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállásának meghatározása; másrészt tervezési görbék [13, 21] származtatása különböző szerkezeti acélokhoz, valamint az egyre nagyobb szerephez jutó nagyszilárdságú acélokhoz [22] és hegesztett kötéseikhez, I (tehát nyitó vagy húzó) terhelésmódban.

2. TERVEZÉSI GÖRBÉK FÁRADÁSOS REPEDESTERJEDÉSRE

A tervezési görbék jelentőségét – a mérnöki szemléletmód támasztotta általános igény mellett – két további tény is fokozza. Egyfelől az, hogy a fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok átvételi vizsgálatként való előírása még nem

általánosan elterjedt; másfelől pedig az, hogy a hegesztett kötések törésmechanikai anyagjellemzőinek meghatározására legkorábban a szerkezet, szerkezeti elem gyártásával azonos időben kerülhet sor [18]. Ennek megfelelően a különböző előírások, közlemények – tekintettel a fáradásos repedésterjedést befolyásoló tényezőkre [23] – rögzített (behatárolt) körülményekre érvényes határgörbéket javasolnak.

A [24] előírás a határgörbék két típusát különbözteti meg, az egyik típus a kinetikai diagram középső, II. tartományát egy, a másik típus pedig két egyenessel írja le. A két változatot – vázlatosan – a 2. ábra mutatja be ($P-E =$ Paris-Erdogan, $\Delta K_0 = \Delta K_{th}$, $K_c = \Delta K_{fc}$).



2. ábra. Tervezési görbék fáradásos repedésterjedésre a [24] előírás alapján (elvi ábra)

A [25] előírásban (napjainkban hatályos változata [26]) megadott görbe az (1) összefüggésen alapul és a vizsgálati adatok felső határértékéhez tartozik (da/dN : mm/ciklus, ΔK : MPam^{1/2}):

$$\frac{da}{dN} = 4,71 \cdot 10^{-10} \Delta K^{3,726} \quad (2)$$

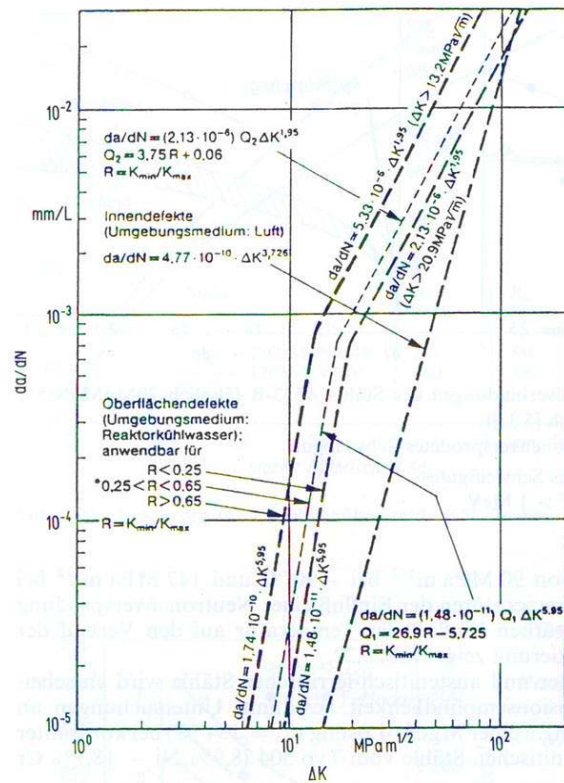
A görbe ötvözetlen és gyengén ötvözött ferrites acélokra, $R = 0-0,8$ terhelés aszimmetria tényező, $T = 20-300$ °C hőmérséklet, $f = 0,17-160$ Hz terhelési frekvencia és $s = 5-100$ mm anyagvastagság tartományban, levegő közeg esetén érvényes. A hibák pozíciójának változása és a közeg befolyása ettől eltérő (két szakaszra osztott) határgörbéket eredményez, amelyeket a 3. ábra szemléltet [17].

A [27] előírásban közölt görbék szintén az (1) összefüggésen alapulnak. Ferrites, $R_y = 600$ MPa-nál kisebb folyáshatárú acélokra, levegőben és nem agresszív közegekben, a 97,5 %-os túlélési valószínűség alapján számított görbe egyenlete

$$\frac{da}{dN} = 7,4 \cdot 10^{-10} \Delta K^4 \quad (3)$$

a 99,5 %-os túlélési valószínűség alapján számított görbe egyenlete pedig

$$\frac{da}{dN} = 1,7 \cdot 10^{-9} \Delta K^4 \quad (4)$$



3. ábra. Fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési görbék az ASME Boiler and Pressure Vessel Code alapján [17]

Ugyanezen acélokra és hegesztett kötéseikre, a vizsgálati adatok felső határértékéhez tartozó görbe:

$$\frac{da}{dN} = 9,49 \cdot 10^{-9} \Delta K^3 \quad (5)$$

A [24] előírásban a 2. ábrán bemutatott egyszerű kapcsolat acélokra, beleértve az ausztenites acélokat is, $T = 100$ °C hőmérsékletig, levegő, illetve nem agresszív közeg esetén

$$\frac{da}{dN} = 5,21 \cdot 10^{-13} \Delta K^3 \quad (6)$$

alakú, ahol – kivételesen – da/dN mm/ciklus-ban, ΔK pedig N/mm^{3/2}-ben értendő. Növelt hőmérsékleten, $T = 600$ °C-ig, a (6) összefüggés a

$$\frac{da}{dN} = 5,21 \cdot 10^{-13} \left(\frac{E_{RT}}{E_{ET}} \right)^3 \Delta K^3 \quad (7)$$

alakúra módosul, amelyben E_{RT} a rugalmassági modulusz szobahőmérsékleten (20 °C-on), E_{ET} pedig a rugalmassági modulusz a növelt hőmérsékleten. Tengeri környezetben, acélokra, kivéve az ausztenites acélokat, $T = 20$ °C-ig, katódvédelem alkalmazásával, vagy annak alkalmazása nélkül, a görbe egyenlete az alábbi:

$$\frac{da}{dN} = 2,3 \cdot 10^{-12} \Delta K^3 \quad (8)$$

A két szakaszra osztott kapcsolatokat (2. ábra jobb oldali ábrarészlete) két acél anyagminőség csoportra adja meg az előírás. Az egyik csoportba tartozó anyagminőségek folyáshatára $R_y \leq 700 \text{ N/mm}^2$, levegőben, illetve nem agresszív közegekben, $T = 100 \text{ °C}$ -ig alkalmazhatók. A másik csoportba tartozó anyagminőségek folyáshatára $R_y \leq 600 \text{ N/mm}^2$, tengeri környezetben, $T = 20 \text{ °C}$ -ig alkalmazhatók. Az erre a csoportra vonatkozó adatok $T = 5-20 \text{ °C}$ hőmérséklet, $f = 0,17-0,5 \text{ Hz}$ frekvencia tartományokban, mesterséges tenger-vízben vagy 3 % NaCl oldatban végzett vizsgálatokból származnak, így a vonatkozó intervallumokon kívüli felhasználásukhoz külön ellenőrzés (igazolás) szükséges. Mindkét csoportra külön adatokat találhatunk az $R < 0,5$ és az $R \geq 0,5$ terhelés aszimmetria tényező tartományokra. Az előírás megadja a középértékre és a középérték + 2 szórás esetre is az adatokat, a hegesztett kötésekben lévő anyagfolytonossági hiányok értékelésére a középérték + 2 szórás és az $R \geq 0,5$ terhelés aszimmetria tényezőhöz tartozó adatok alkalmazhatók. A különböző esetekre vonatkozó, nagyszámú, konkrét érték az előírásban megtalálható.

A [28] szabvány az (1) összefüggés módosított, a terhelés aszimmetria tényező befolyását kifejező változatát ajánlja, az $R = 0-1$ terhelés aszimmetria tényező intervallumban:

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{1+R}{1-R} \right) \Delta K^n \quad (9)$$

Az előírás szerkezeti acélokra és hegesztett kötésekre – a vizsgálati eredmények $n = 2-4$ tartománya alapján – az $n = 4$ érték alkalmazását javasolja és az (1) összefüggés két paramétere között meglévő kapcsolat [29, 30, 31] alapján C értékének számítására a

$$C = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{17,27^n} \quad (10)$$

összefüggést adja meg.

A [32] előírás, szintén az (1) képletnek megfelelően, a vizsgálati adatok középérték + 2 szórás értékhez tartozó összefüggést ad meg, ami hegesztett kötésekre és nem korrozív közegekre az alábbi:

$$\frac{da}{dN} = 1,42 \cdot 10^{-8} \Delta K^{3,1} \quad (11)$$

A [33] közleményben bemutatott tervezési görbe a [34] és a [35] munkákra támaszkodó

$$\frac{da}{dN} = C_m (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (12)$$

összefüggésen alapul. Az összefüggés állandóit a [36] publikációban összefoglalt, a [37] és a [38] közleményekben közölt adatokkal kiegészítve, matematikai-statisztikai módszerekkel határozták meg, a tervezéshez a szerzők a 99,5%-os konfidencia intervallumhoz tartozó görbét ajánlják. Ennek egyenlete:

$$\frac{da}{dN} = 2,5 \cdot 10^{-8} (\Delta K^{2,75} - 2^{2,75}) \quad (13)$$

érvényessége pedig a hivatkozott forrásmunkákban részletesen körülírt kísérleti körülményekkel azonos. E körülmények közül kettő kiemelésre is érdemes, az egyik a véletlenszerű terhelés, a másik pedig az, hogy ferrites acélok mellett ausztenites acélokra és hegesztett kötésekre is végeztek méréseket. A (12) összefüggés mellett a [33] közlemény a

$$\frac{da}{dN} = 1,45 \cdot 10^{-8} (\Delta K^{2,75} - 2,4^{2,75}) \quad (14)$$

formula alkalmazását is megengedi, abban az esetben, ha a biztonsági tényező(k) figyelembevételére a számítások (tervezés, élettartambecslés stb.) elvégzése után kerül sor. További enyhítés, hogy állandó terhelés amplitúdó esetén, ha húzó maradó feszültségek jelenléte kizárható, akkor az adott (konkrét) anyagminőségre meghatározott görbe [36] is felhasználható.

3. VIZSGÁLATOK ÉS EREDMÉNYEIK

A vizsgálatokhoz használt anyagminőségek és hegesztett kötések legfontosabb sajátosságait az 1. táblázat, mechanikai tulajdonságait és az azokból származtatott mennyiségeket (R_y/R_m , illetve R_m * A_5) pedig a 2. táblázat foglalja össze.

Az alapanyagok és a hegesztett kötések vizsgálatára, I terhelésmódban, kompakt szakító (CT) és három ponton terhelt hajlító (TPB) próbatesteken, a varratfémek vizsgálatára pedig TPB próbatesteken került sor. A repedések valós szerkezeti elemekben lehetséges terjedési irányainak figyelembe vétele céljából, ahol azt a geometriai méretek lehetővé tették, az alapanyagokból próbatesteket munkáltunk ki a hengerlési irányval párhuzamos, az arra merőleges és a vastagság irányban terjedő repedések vizsgálatára. A hegesztett kötések esetében a kötés tengelyével párhuzamosan, az arra merőlegesen, valamint a vastagság irányban terjedő repedéseket egyaránt vizsgáltuk, és tekintettel voltunk a hőhatásövezet különböző zónáira is. A próbatestek ilyen kimunkálása, amely egyfajta fizikai szimulációnként is értelmezhető, biztosította a statisztikai szemléletmód minél teljesebb megközelítését. A 4. ábra – példaként – bemutatja az S690QL és az S960QL alapanyagok hegesztett kötéseiből kimunkált próbatestek elhelyezkedését ($RD =$ hengerlési irány).

Acél típus	Anyagminőség	Hegesztő eljárás	Védőgáz	Hozaganyag
mikroötvözött	37C	VFI (ISO kód: 135)	100 CO ₂	VIH-2
mikroötvözött	E420C	VFI (ISO kód: 135)	80 Ar + 20 CO ₂	Union K56
nagyszilárdságú	X80TM	VFI (ISO kód: 135)	82 Ar + 18 CO ₂	X-90 IG
nagyszilárdságú	QStE690TM	–	–	–
nagyszilárdságú	S690QL	VFI (ISO kód: 135)	82 Ar + 18 CO ₂	INEFIL NiMoCr
nagyszilárdságú	S960QL	VFI (ISO kód: 135)	82 Ar + 18 CO ₂	UNION X 96
nagyszilárdságú	XABO 1100	–	–	–

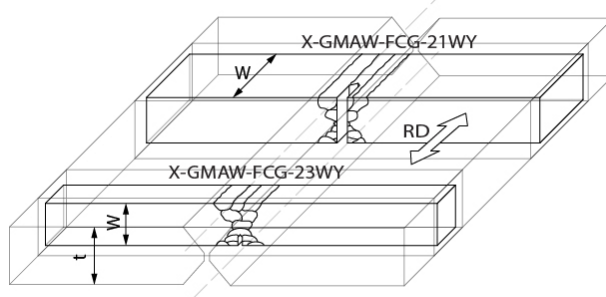
1. táblázat. A vizsgált anyagminőségek és hegesztett kötéseik legfontosabb sajátosságai

Anyagminőség	$R_y^{(1)}$	R_m	R_y/R_m	A_5	$R_m * A_5$
	N/mm ²	N/mm ²	–	%	N/mm ² * %
37C alapanyag	270	405	0,666	33,5	13567
VIH-2 varrat(fém)	410-485	535-585	0,766-0,829	22,0-24,8	≥11770
E420C alapanyag	450	595	0,756	30,7	18266
Union K56 varrat(fém)	≥500	560-720	0,694-0,893	≥22,0	≥12320
X80TM alapanyag	540	625	0,864	25,1	15687
QStE690TM alapanyag	780	850	0,918	18,3	15555
Böhler X90-IG varrat(fém)	≥890	≥940	≈0,947	≥16,0	≥15040
S690QL alapanyag	809	850	0,952	17,0	14450
INEFIL NiMoCr varrat(fém)	750	820	0,915	19,0	15580
S960QL alapanyag	1007	1045	0,964	16,0	16112
UNION X 96 varrat(fém)	>930	>980	≈0,949	>14	>13720
XABO 1100 alapanyag	1125	1339	0,840	11,0 ⁽²⁾	14729 ⁽²⁾

⁽¹⁾ R_y jelentése R_{eH} vagy $R_{p0,2}$.

⁽²⁾ Ennél az anyagminőségnél A_5 helyett A_{97} .

2. táblázat. A vizsgált anyagminőségek és hegesztő hozaganyagok mechanikai tulajdonságai (fehér oszlopok) és az azokból származtatott mennyiségek (sárga oszlopok)



4. ábra. A próbatestek elhelyezkedése az S690QL és az S960QL alapanyagok hegesztett kötéseiben

A vizsgálatokra a [39] előírás alapján, MTS gyártmányú, univerzális, elektro-hidraulikus anyag-

vizsgáló rendszeren került sor. A vezérlési mód ΔK -csökkentéses és állandó terhelésamplitúdójú, a terhelés aszimmetria tényező pedig állandó értékű ($R = 0,1$) volt. A vizsgálatokat szobahőmérsékleten, laboratóriumi közegben és szinusz alakú terhelési függvénnyel végeztük, a terjedő repedést optikai úton vagy compliance módszerrel követtük.

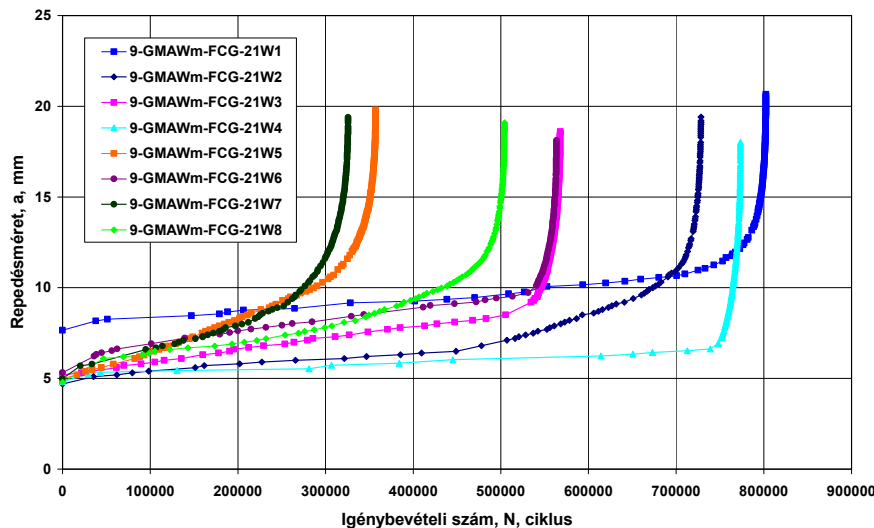
Az 5. ábra – szintén példaként – bemutatja az S960QL alapanyag 21 orientációjú hegesztett kötéseiben ($m = \text{matching hozaganyag}$) elvégzett fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredményeit, a repedésméret-igénybevételi ciklusszám görbéket ($a-N$).

Az 5. ábra görbéi szemléletesen mutatják azt, hogy a viszonylag nehezen keletkező repedések

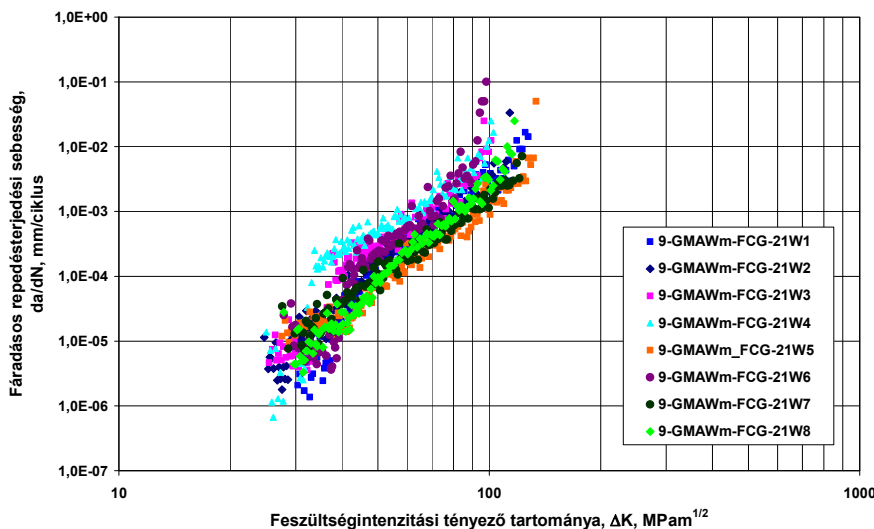
terjedése az igénybevételi ciklusszám növekedésével erősen felgyorsul.

A 6. ábra – ugyancsak példaként – bemutatja a fáradásos repedésterjedés véges differenciák módszerével [39] számított kinetikai diagramjait (fáradásos repedésterjedési sebesség-

feszültségintenzitási tényező tartománya, $da/dN-\Delta K$) a vizsgált S960QL alapanyag hegesztett kötéseiből készített 21 orientációjú próbatesteken. A kapott pontsorok, illetve azok együttese, alátámasztják az elvégzett vizsgálatok megbízhatóságát.



5. ábra Az S960QL alapanyag hegesztett kötéseiből készített 21 orientációjú próbatestek repedésméret-igénybevételi szám ($a-N$) görbéi



6. ábra. Az S960QL alapanyag hegesztett kötéseiből készített 21 orientációjú próbatestek kinetikai diagramjai ($da/dN-\Delta K$)

4. A FÁRADÁSOS REPEDÉSTERJEDÉSRE ÉRVÉNYES TERVEZÉSI GÖRBÉK MEGHATÁROZÁSA

A fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési görbék meghatározása alkalmazott módszer hat lépésből áll [13].

Első lépés: a fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok kiértékelése, vagyis a mérési eredmények meghatározása. A feszültségintenzi-

tási tényező tartománya küszöbértékének (ΔK_{th}) és a Paris-Erdogan összefüggés két állandójának (C és n) a meghatározására a [39] előírás alapján kerül sor. A fáradásos repedésterjedési sebességeket a fáradásos repedésterjedési sebesség értékeket a véges differenciák módszerével vagy a hét ponton átmenő polinomos módszerrel számítottam, a ciklikus törési szívósság értékeket (ΔK_{fc}) pedig a vizsgálatok során detektált utolsó repedésméretetek segítségével határoztam meg. Az

eredményeket a 3. táblázat foglalja össze. A mérési sorozat eredményei, különösen a korrelációs indexek, számszerűleg is igazolják az eredmé-

nyek megbízhatóságára, a 6. ábra kapcsán tett megállapítást.

A próbatest jele	C MPam ^{1/2}	n mm/ciklus	Korrelációs index	ΔK_{fc} MPam ^{1/2}
9-GMAWm-FCG-21W1	1,052E-12	4,760	0,9743	128,46
9-GMAWm-FCG-21W2	1,035E-12	4,766	0,9798	115,46
9-GMAWm-FCG-21W3	8,694E-11	3,848	0,9530	101,82
9-GMAWm-FCG-21W4	7,066E-10	3,466	0,9665	103,28
9-GMAWm-FCG-21W5	1,999E-12	4,420	0,9834	134,85
9-GMAWm-FCG-21W6	1,864E-12	4,772	0,9548	98,98
9-GMAWm-FCG-21W7	6,791E-12	4,200	0,9832	123,43
9-GMAWm-FCG-21W8	6,678E-14	5,330	0,9897	117,79

3. táblázat. Az S960QL jelű acél hegesztett kötéseiből készült 21 orientációjú próbatesteken elvégzett fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredményei

Második lépés: a mérési eredmények statisztikai mintákba rendezése. A mérési eredmények ismeretében (anyagminőségenként, illetve hegesztett kötésenként) megvizsgáltam, hogy a különböző orientációjú próbatesteken elvégzett vizsgálatok eredményei, mint statisztikai minták, szignifikánsan különböznek-e egymástól, vagy sem. Ennek eldöntésére a Wilcoxon-próbát alkalmaztam, $\varepsilon = 0,05$ kétoldali szignifikanciaszinten. Azok a minták, amelyek szignifikánsan nem különböztek egymástól, összevonásra kerültek egy közös mintába. Ezek után kiszámoltam a kapott minták legfontosabb statisztikai jellemzőit: átlag, szórás és szórási együttható. Az S960QL alapanyag hegesztett kötéseiből készített 21 orientációjú próbatestek mintáit a 4. táblázat mutatja be. A táblázatban közölt szórási együtthatók a hegesztett kötések törésmechanikai vizsgálatainál megszokott értékekkel jó összhangban vannak.

Minta	Elem- szám	Átlag	Szórás	Szórási együttható
n	8	4,445	0,594	0,134
ΔK_{fc}	8	115,5	13,20	0,114

4. táblázat. Az S960QL jelű acél hegesztett kötéseiből készült 21 orientációjú próbatesteken elvégzett fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredményeiből képzett minták

Harmadik lépés: az eloszlásfüggvény típusának megválasztása. Ebben a lépésben annak vizsgálatára került sor, hogy melyik eloszlásfüggvény típus alkalmas az összes minta leírására, a műszaki gyakorlatban általánosan elterjedt normális, a fárasztóvizsgálatok értékelésénél használatos logaritmus normális és a küszöbparaméterrel bíró háromparaméteres Weibull eloszlás közül. Erre a célra a Shapiro-Wilk, a Kolmogorov-féle egyminőség, valamint a χ^2 -próbákat [40, 41, 42] használ-

tam, minden próba esetén $\varepsilon = 0,05$ szignifikanciaszinten. Eredményül az adódott, hogy csak a háromparaméteres Weibull eloszlás esetében fogadható el az illeszkedés minden mintára, vagyis ez az eloszlásfüggvény alkalmas az összes minta leírására. Megjegyzésre érdemes, hogy a háromparaméteres Weibull eloszlás a törésmechanika alkalmazásának több területén (például [18, 19]) bizonyult már alkalmasnak.

Negyedik lépés: a háromparaméteres Weibull eloszlás eloszlásfüggvényei paramétereinek meghatározása. Ebben a lépésben az

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - N_0}{\beta} \right)^{1/\alpha} \right], \quad (15)$$

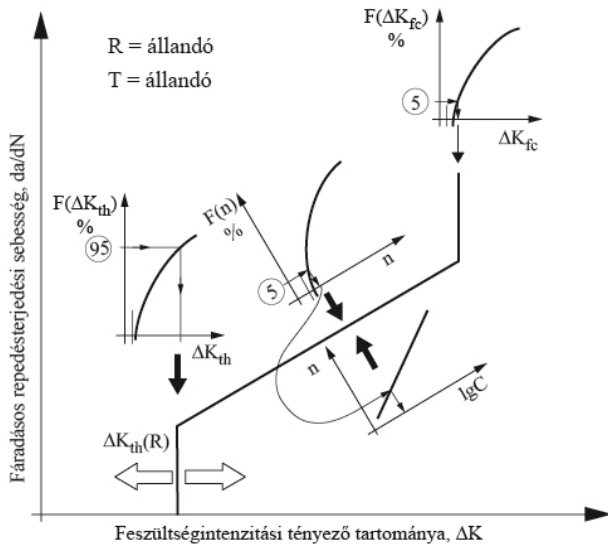
eloszlásfüggvény küszöbparaméterének (N_0), alakparaméterének (α) reciprokának és léptékparaméterének (β) meghatározására került sor.

Ötödik lépés: az eloszlásfüggvények karakterisztikus értékeinek megválasztása. A meghatározott háromparaméteres Weibull eloszlásfüggvényekből, az egyes mennyiségek élettartamra gyakorolt hatása alapján, kiválasztottam a ΔK_{th} , az n és a ΔK_{fc} karakterisztikus értékeit. Ezen értékek segítségével megbízható módszer származtatható a fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési görbék meghatározására, a következők szerint:

- a feszültségintenzitási tényező tartományának küszöbértéke, ΔK_{th} , a vonatkozó eloszlásfüggvény 95%-os (tehát nagy) valószínűséghez tartozó értéke;
- a Paris-Erdogan összefüggés kitevője, n , a vonatkozó eloszlásfüggvény 5%-os (tehát kis) valószínűséghez tartozó értéke;
- a Paris-Erdogan összefüggés állandója, C , a két állandó (C és n) közötti korrelációs kapcsolatból számítható érték;

- a ciklikus törési szívósság, ΔK_{fc} , a vonatkozó eloszlásfüggvény 5%-os (tehát szintén kis) valószínűséghez tartozó értéke.

A Paris-Erdogan összefüggés két állandójának kapcsolatát több közlemény is megemlíti, illetve bemutatja, amelyek közül a már hivatkozott [23, 29-31] munkákat emelem ki. A származtatás módszerét és a tervezési görbe (elvi) alakját – [13] alapján – a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra. A fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési határgörbe származtatásának módszere és a határgörbe elvi alakja ([13] alapján)

Hatodik lépés: a fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési görbék paramétereinek számí-

tása. A meghatározott tervezési görbék paramétereit az 5. táblázat foglalja össze. Azokban az esetekben, amikor az egyes orientációkban számított n , illetve ΔK_{fc} értékek szignifikánsan különböztek, a vonatkozó értékek közül a kisebbet vettem figyelembe.

Az 5. táblázatban közölt adatokhoz a következő megjegyzések fűzhetők:

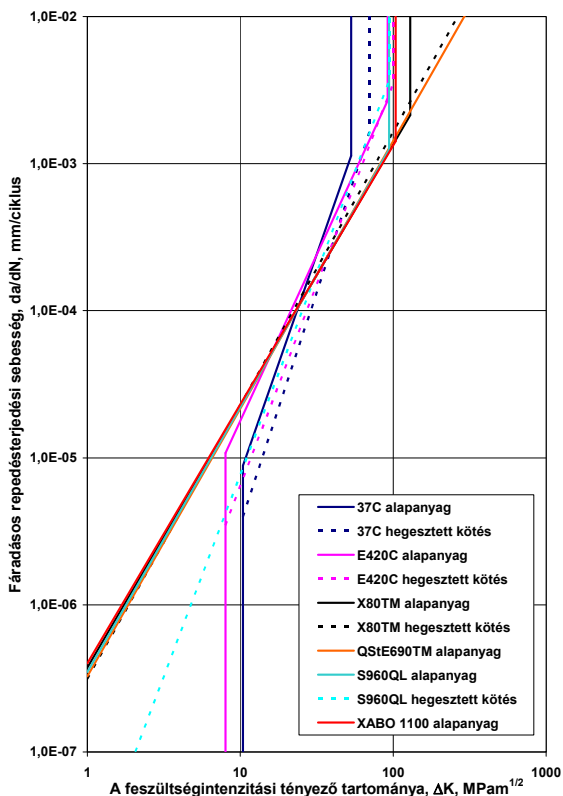
- az adatok I (nyitó) terhelési módra érvényesek;
- a 37 C és az E 420 C jelű anyagminőségek esetében, a hegesztett kötésekre érvényes ΔK_{th} értékek a hegesztési maradó feszültségek jellegének megítélése és nagyságának becslése után az alapanyagra meghatározott értékből származtathatók;
- a 37 C jelű anyagminőség hegesztett kötéseiből készült 16 próbatesten, nyomó maradó feszültségek jelenléte esetén mért ΔK_{th} értékek átlaga $16,91 \text{ MPam}^{1/2}$;
- az E 420 C jelű anyagminőség hegesztett kötéseiből készült 4 próbatesten, nyomó maradó feszültségek jelenléte esetén mért ΔK_{th} értékek átlaga $16,29 \text{ MPam}^{1/2}$.
- A előzőekben leírt módszerrel meghatározott és az 5. táblázat szerinti paraméterekkel rendelkező (egyszerű kapcsolat szerinti) tervezési görbéket a 8. ábra szemlélteti. Az ábrán három fajta görbe látható: csak n és C értéke ismert, n és C mellett ΔK_{fc} értéke is ismert, illetve n és C és ΔK_{fc} mellett ΔK_{th} értéke is ismert.

Anyagminőség	ΔK_{th} MPam ^{1/2}	n MPam ^{1/2}	C mm/ciklus	ΔK_{fc} MPam ^{1/2}
37C alapanyag	10,4	2,98	8,22E-09	53
37C hegesztett kötés	–	3,16	2,42E-09	70
E420C alapanyag	8,0	2,26	9,78E-08	92
E420C hegesztett kötés	–	2,74	1,16E-08	101
X80TM alapanyag	–	1,78	3,74E-07	129
X80TM hegesztett kötés	–	1,86	3,13E-07	–
QStE690TM alapanyag	–	1,82	3,27E-07	–
S690QL alapanyag	kidolgozás alatt			
S690QL hegesztett kötés	kidolgozás alatt			
S960QL alapanyag	–	1,80	3,50E-07	94
S690QL hegesztett kötés	–	2,75	1,36E-08	95
XABO 1100 alapanyag	–	1,76	4,00E-07	104

5. táblázat. A különböző alapanyagok és hegesztett kötéseik fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési görbéinek paramétereit

5. AZ EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A vizsgált anyagminőségek és hegesztett kötések esetében mind a feszültségintenzitási tényező tartományának küszöbértéke (ΔK_{th}) mind a Paris-Erdogan összefüggés kitevője (n) a szilárdság növekedésével tendenciájában csökken, a ciklikus törési szívósság (ΔK_{fc}) esetében ilyen jellemző irány nem állapítható meg.



8. ábra. A különböző alapanyagok és hegesztett kötések fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési görbéi

A vizsgált anyagminőségeknél mind a Paris-Erdogan összefüggés kitevője (n), mind a ciklikus törési szívósság (ΔK_{fc}) nagyobb értékű a hegesztett kötések esetében, mint az alapanyagoknál.

A meghatározott tervezési görbék a feszültségintenzitási tényező tartományának küszöbértékének (ΔK_{th}) környezetében nyitottak. Ennek értelme kettős. Azokban az esetekben, amikor a feszültségintenzitási tényező tartományának küszöbértéke nincs megadva, akkor a vonatkozó irodalmi forrásokban (például [43, 44]) található adatok alkalmazhatók. Hegesztett kötések esetében, akár adott ΔK_{th} értéke, akár nem, a maradó feszültségek jellegének megítélése és nagyságrendjének becslése után az adott érték módosítható, illetve annak figyelembevételével választandó meg. Nyomó maradó feszültségek esetében ΔK_{th} értéke

növelhető, míg húzó maradó feszültségek esetében csökkenteni kell azt.

A számított tervezési görbék a különböző forrásokban megadott tervezési görbék környezetében, illetve azok között helyezkednek el. Ezt az magyarázza, hogy a hivatkozott források nem konkrét anyagminőségekre, hanem szilárdsági tulajdonság intervallumokat kielégítő anyagminőségek összességére adnak meg határgörbéket. A jelen közleményben szereplő anyagminőségek ezeken az intervallumokon részben kívül esnek (magasabb szilárdságúak), ami egyrészt az alkalmazott módszer megbízhatóságát, másrészt a konkrét anyagminőségekre vonatkozó görbék szükségességét egyaránt alátámasztja.

A saját vizsgálatok eredményeit összehasonlítva az irodalomban (például [45]) található adatokkal, megállapítható azok jó összhangja.

6. KÖVETKEZTETÉSEK

Az elvégzett vizsgálatok, azok eredményei, az eredmények feldolgozása és az irodalomban található vonatkozó adatok, illetve az azokkal elvégzett összehasonlítások alapján az alábbi következtetések fogalmazhatók meg.

- A bemutatott módszer általánosan alkalmazható fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési görbék meghatározására, szerkezeti és nagyszilárdságú acélokhoz és hegesztett kötésekhez, I (nyitó) terhelésmódban.
 - = Megjegyzésre érdemes, hogy a módszer I+II (nyitó+nyíró) terhelésmód esetén is alkalmazható fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési görbék meghatározásához. Ilyenkor a feszültségintenzitási tényező tartomány (ΔK) helyett annak effektív értékét (ΔK_{eff}) kell használni [46, 47, 48].
 - = A módszer további anyagminőségekhez – fémekhez és ötvözetekhez (például nyomástartó edények anyagai, alumíniumötvözetek, ausztemperált gömbgrafitos öntöttvas), illetve nemfémekhez (például szilícium-nitrid kerámiák, polimer, polimer mátrixú kompozitok) – való alkalmazhatóságáról a [49-51] saját közleményekben található információk.
- A [24] előírás bemutatja a fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési görbék olyan típusát is, amely a kinetikai diagram középső tartományát nem egy, hanem két egyenes segítségével írja le. A jelen közleményben vizsgált anyagminőségek, illetve a vizsgálati körülmények ilyen sajátosságot jellemzően nem mutattak, így ennek a típusnak az alkalmazására nem került sor. Más anyagminőségre ta-

lálhatunk alkalmazási példát saját közleményekben (például [52, 53]).

- A bemutatott és alkalmazott módszer érvényesíti az ésszerű kockázatvállalás (nem a legkedvezőtlenebb esetet vesszük figyelembe) és a biztonságra való törekvés (tudjuk, hogy milyen bizonytalansággal dolgozunk) kompromisszumát.
- A meghatározott, fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési görbék segítségével repedést vagy repedésszerű hibát tartalmazó szerkezetek, szerkezeti elemek integritásának megítélését lehetővé tevő, illetve segítő számítások végezhetők. A számítások az alábbiakra terjedhetnek ki:
 - = a terjedőképes és a kritikus (értsd: tönkremenetelt okozó) repedésméreték meghatározása;
 - = a terjedőképes repedésmérethez tartozó élettartam meghatározása;
 - = a maradó élettartam függvény meghatározása, az azt befolyásoló hatások feltérképezése (paraméter- vagy érzékenységvizsgálat);
 - = a maradó élettartam becslése megbízhatóságának megítélése;
 - = károsodási paraméter(ek) és károsodási függvény(ek) számítása [48, 54].
 - A hegesztett kötésekre vonatkozó vizsgálatokat tovább kell folytatni. Ezek keretében ki kell térni a hegesztéstechnológiára, illetve a hegesztési paraméterekre és azok hatásaira, hiszen azok alapvetően befolyásolják a hegesztett kötések tulajdonságait, illetve megfelelőségét (például [55, 56]).

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közleményben ismertetett kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projekt eredményeire alapozva, a TÁMOP-4.2.2/A-11/1-KONV-2012-0029 jelű projekt részeként, – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

RODALOMJEGYZÉK

- [1] Rittinger J.: Származtatott törésmechanikai anyagjellemzők használata a rideg törésnek kitett szerkezetek ellenőrzésében. *Anyagvizsgálók Lapja*, www.anyagvizsgaloklapja.hu, 2004/3, pp. 87-88.
- [2] Outline of fatigue of welded joints or six ways of counteracting fatigue. SSAB OX TechSupport, Information from SSAB Oxelösund #42, S-42-fatigue-uk-v1-2004.
- [3] D. V. Hoepfner, W. E. Krupp: Prediction of component life by application of fatigue crack growth. *Engineering Fracture Mechanics*, 1974, Vol. 6, pp. 47-70.
- [4] A. C. Pickard: Component lifing. *Materials Science and Technology*, September, 1987, Vol. 3, pp. 743-749.
- [5] D. Radaj: Assessment of fatigue strength of welded structures based on local parameters. *Fatigue design 1995*, Helsinki, 5-8 September, 1995. Eds.: G. Marquis, J. Solin. Technical Research Centre of Finland, Espoo, 1995, Vol. III, pp. 349-366.
- [6] K.-O. Edel: Mit Rissen leben? Zur Betriebssicherheit rissgeschaedigter Bauteile. Fachhochschule Brandenburg, Hochschulreihe 1/93, Fachhochschule Brandenburg, 1993.
- [7] Zsáry Á.: Méretezés kifáradásra a gépészetben. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
- [8] Romvári P., P. Speier, Tóth L.: Varrathibák kimutathatóságát befolyásoló tényezők. V. Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Szeminárium, Gyula, 1985. május 30 – június 1. Különlenyomat, pp. 1-9.
- [9] Novotny L.: A törésmechanika alkalmazása hegesztett nyomástartó edényekben lévő hibák megítélésére. *Gép*, (34) 1982/12, pp. 473-479.
- [10] Rittinger J.: A roncsolásmentes anyagvizsgálat helye és szerepe a termék-megfelelőség tanúsításában és a hegesztett szerkezetek üzemeltetésre való alkalmasságának megítélésében. *Anyagvizsgálók Lapja*, www.anyagvizsgaloklapja.hu, 2006/3, pp. 90-94.
- [11] S. W. Hopkins, C. A. Rau Jr.: Prediction of structural crack growth behavior under fatigue loading. *Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis*, ASTM STP 738. Eds.: S. J. Hudak Jr., R. J. Bucci. ASTM, 1981. pp. 255-270.
- [12] Merkblatt DVS 2401 Teil 2 (April 1989): Bruchmechanische Bewertung von Fehlern in Schweissverbindungen. *Praktische Anwendung*.
- [13] Lukács J.: Repedést tartalmazó hegesztett kötések megbízhatósága ismétlődő igénybevétel esetén. Kandidátusi értekezés, Miskolc-Budapest, 1992.

- [14] R. J. Allen, G. S. Booth, T. Jutla: A review of fatigue crack growth characterisation by linear elastic fracture mechanics (LEFM). Part I. – Principles and methods of data generation. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 11, No. 1, pp. 45-69, 1988.
- [15] R. J. Allen, G. S. Booth, T. Jutla: A review of fatigue crack growth characterisation by linear elastic fracture mechanics (LEFM). Part II. – Advisory documents and applications within national standards. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 11, No. 2, pp. 71-108, 1988.
- [16] D. Broek: *The practical use of fracture mechanics*. Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [17] H. Blumenauer, G. Pusch: *Technische Bruchmechanik*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig-Stuttgart, 1993.
- [18] Rittinger J.: Referencia görbék jelentősége a törésmechanika gyakorlati alkalmazásánál. *Gép*, (34) 1982/10. pp. 393-399.
- [19] D. E. McCabe, J. G. Merkle, K. Wallin: Technical basis for the master curve concept of fracture toughness evaluations in the transition range. *Fatigue and Fracture Mechanics: 30th Volume*, ASTM STP 1360. Eds.: P. C. Paris, K. L. Jerina. ASTM, West Conshohocken, PA, 2000, pp. 21-30.
- [20] P. Paris, F. Erdogan: A critical analysis of crack propagation laws. *Journal of Basic Engineering*, Transactions of the ASME, December 1963, pp. 528-534.
- [21] Lukács J., Artinger I.: Tervezési határgörbék a fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállás megítéléséhez. *Gépgyártástechnológia*, (32) 1992/5-6, pp. 183-190.
- [22] Balogh A., Gáspár M., Prém L.: A hegesztett szerkezetek konvencionális és korszerű nagyszilárdságú acéljainak rendszerezése és hegesztési nehézségei. *Gép*, (64) 2013/8. pp. 7-12.
- [23] Rittinger J.: Adatok fáradásos repedésterjedés sebességére. Tanulmány. Készült az ERŐKAR-AÁEFO megbízásából, az SZJH-21611/T/92. alapján. Budapest, 1992.
- [24] BS 7910-1999: Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures.
- [25] ASME Boiler and Pressure Vessel Code-1977: SECTION XI. Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components. DIVISION 1.
- [26] ASME Boiler and Pressure Vessel Code-2010 Edition.
- [27] BSI PD 6493-1980: Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defect in Fusion Welded Joints.
- [28] WES 2805-1980: Method of Assessment for Defects in Fusion Welded Joints with Respect to Brittle Fracture.
- [29] Romvári P., Tóth L., Nagy Gy.: Adalékok a fáradt repedés terjedési sebességét leíró összefüggésekhez. *Gép*, (32) 1980/9. pp. 325-333.
- [30] A. Iost: The effect of load ratio on the $m\text{-}lnC$ relationship. *International Journal of Fatigue*, 13, No. 1, January 1991, pp. 25-33.
- [31] W. G. Clark Jr., S. J. Hudak Jr.: Variability in Fatigue Crack Growth Rate Testing. *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol. 3, No. 6, pp. 454-476, 1975.
- [32] Det norske Veritas, Classification Notes, Note No. 30.2.-August 1984: Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Units.
- [33] A. Ohta et al.: Fatigue Crack Propagation Curves for Design of Welded Structures. *Transactions of the Japan Welding Society*, Vol. 20, No. 1, April 1989, pp. 17-23.
- [34] M. Klesnil, P. Lukas: Effect of stress cycle asymmetry on fatigue crack growth. *Materials Science and Engineering*, 9 (1972), pp. 231-240.
- [35] A. Ohta, E. Sasaki: Influence of Stress Ratio on the Threshold Level for Fatigue Crack Propagation in High Strength Steels. *Engineering Fracture Mechanics*, 1977, Vol. 9, pp. 307-315.
- [36] A. Ohta et al.: Statistical Evaluation of Fatigue Crack Propagation Properties Including Threshold Stress Intensity Factor. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 24, No. 6, pp. 789-802.
- [37] Data Sheets on Fatigue Crack Propagation Properties for Butt Welded Joints of SUS304-HP (18Cr-8Ni) Hot Rolled Stainless Steel Plate. *NRIM Fatigue Data Sheet*, No. 54. National Research Institute for Metals, Tokyo, 1986.

- [38] A. Ohta et al.: Near-Threshold Fatigue Crack Propagation in Welded Joints under Random Loading. Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 19, No. 2, October 1988, pp. 69-73.
- [39] ASTM E647-11e1: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rate.
- [40] Vincze I.: Matematikai statisztika ipari alkalmazásokkal. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.
- [41] Balogh A., Dukáti F., Sallay L.: Minőségellenőrzés és megbízhatóság. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980.
- [42] D. B. Owen: Handbook of statistical tables. Vychislitel'nyjj Centr AN SSSR, Moskva, 1973. (Orosz nyelven.)
- [43] D. Taylor: A compendium of fatigue thresholds and growth rates. EMAS, Warley, 1995.
- [44] Sourcebook on fatigue crack propagation: thresholds and crack closure. Eds.: D. Taylor, L. Jianchun. EMAS, Warley, 1993.
- [45] Bruchmechanische Werkstoffcharakterisierung. Hrsg.: H. Blumenauer. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1991.
- [46] Lukács J.: Fatigue crack propagation in railway rails under I and I+II loading conditions. Proceedings of the Sixth International Fatigue Congress (FATIGUE'96), Berlin, 6-10 May 1996. Eds.: G. Lütjering, H. Nowack. Pergamon, Vol. II, pp. 1189-1194.
- [47] Lukács J.: Módszer fáradásos repedésterjedésre érvényes tervezési görbék meghatározására és annak alkalmazása nagyszilárdságú acélokhoz. Bányászati és Kohászati Lapok, (145) 2012/3. pp. 43-48.
- [48] Lukács J., Nagy Gy., Harmati I., Koritárné F. R., Kuzsella Lné. K. Zs.: Szemelvények a mérnöki szerkezetek integritása témaköréből, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2012.
- [49] Lukács J.: Determination of fatigue crack propagation limit curves and their application for pipelines having crack like defects. Third International Pipeline Technology Conference, Brugge, May 21-24, 2000. Ed.: R. Denys. Elsevier Science B. V., 2000. Vol. II, p. 127-140.
- [50] Lukács J.: Determination of fatigue crack propagation limit curves for metallic and non-metallic materials. Proceedings of the Eighth International Fatigue Congress (FATIGUE 2002), Stockholm, 3-7 June 2002. Ed.: A. F. Blom. EMAS, West Midlands, 2002. Vol. 2/5. p. 1179-1186.
- [51] Lukács J.: Fatigue crack propagation limit curves for different metallic and non-metallic materials. Materials Science Forum, Vols. 414-415, (2003) pp. 31-36.
- [52] Lukács J.: Two Methods for Determination of Fatigue Crack Propagation Limit Curves and their Application for Different Materials. Key Engineering Materials, Vols. 345-346, (2007) pp. 395-398.
- [53] Lukács J.: Two Methods for Determination of Fatigue Crack Propagation Limit Curves and their Application for High Strength Steels. International Conference on New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels, Buenos Aires, 26-28 May, 2008. Proceedings on CD-ROM, 2008, pp. 1-13.
- [54] Lukács J.: Determination of fatigue crack propagation limit curves and one possibility of their application. International Conference on Metal Structures (ICMS-03), Miskolc, April 3-5, 2003. Metal Structures – Design, Fabrication, Economy. Eds.: Jármái K., Farkas J. Millpress, Rotterdam, 2003. p. 33-38.
- [55] Gáspár M.: A hőmérsékletmező előállítása nagyszilárdságú acélok hegesztésének végeeselemes modellezésekor. Gép, (64) 2013/5. pp. 37-42.
- [56] Gáspár M., Balogh A.: GMAW experiments for advanced (Q+T) high strength steel. Production Processes and Systems, Vol. 6, (2013) No. 1, pp. 9-24.