

ANYAGOK KÁROSODÁSA ÉS VIZSGÁLATA KÜLÖNBÖZŐ ÜZEMI KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT

FÁRADÁSOS REPEDÉSTERJEDÉSI SEBESSÉG VIZSGÁLATOK

LUKÁCS JÁNOS

Miskolci Egyetem

THOMAS VARGA

Bécsi Műszaki Egyetem

Készült: a TEMPUS S_JEP_11271 projekt támogatásával

Miskolc - Bécs

- 1999 -

Kiadja a Miskolci Egyetem

A kiadásért felelős: *Dr. Tóth László*

Műszaki szerkesztő: *Dr. Tóth László*

Példányszám: 40

Készült Colitó fóliáról az MSZ 5601-59 és 5602-55 szabványok szerint

Miskolci Egyetem Sokszorosító Üzeme

A sokszorosításért felelős: *Kovács Tiborné*

TB. - '99- - ME

A levonat sokszorosításba leadva: 1999. augusztus 15.

ELŐSZÓ

Minden történelmi korszak fejlődésének megvan a maga hajtóereje. Míg a XIX. században a tudomány előrehaladását egyértelműen a vasúti közlekedés robbanásszerű elterjedése hatotta át (évente átlagosan 10.000 km hosszágban építettek új vasútvonalakat), addig jelen korunkban a mikroelektronika adta lehetőségek szőtték át a mindennapjainkat, így a műszaki életünket is, szolgáltatva annak fejlődéséhez szükséges hajtóerőt. E két periódus fejlődésének sajátosságai természetesen megmutatkoztak a társadalmi struktúra formálódásában is. Az elmúlt században kialakult a nagyüzemi munkásság, megvalósult a tőke koncentrációja és létrejött a reál - dominánsan a műszaki - tudomány művelőinek népes tábora. Ez utóbbiak kivívták maguknak a széles társadalmi elismertséget, hisz tevékenységük közvetlenül hozzájárult a társadalom látható fejlődéséhez. Napjaink sajátossága az *információs társadalom* kialakulása, amelyben a mikroelektronikai elemek fejlődése átszövi a mindennapi életünk, tevékenységünk lehetőségeit. A műszaki életben ez többek között a számítástechnika robbanásszerű elterjedését, a diagnosztikai vizsgálatok eszközparkjának átalakulását, az anyagok viselkedésének, tulajdonságainak mélyebb megismerését szolgáló anyagvizsgálati módszerek, eszközök létrejöttét eredményezték. A fejlődés ütemét jól tükrözi az, hogy mindez az utóbbi 20 évben következett be (pl. a számítógépek mikroprocesszorainak műveleti sebessége 1978-1998 periódusban 3 nagyságrendet változott!).

A nagy értékű műszaki létesítményeket, szerkezeteket (hidakat, erőműveket, gázolajfeldolgozó rendszereket, vegyipari üzemeket, tranzit energiaszállító vezetékeket, repülőgépeket, hajókat, stb.) 15-50 éves üzemeltetésre tervezik az adott periódusban érvényben levő szabványok, műszaki irányelvek figyelembevételével. Ezekben pedig az azt megelőző néhány év ismeretszintje, technológiai színvonala testesedik meg. A mikroelektronika által diktált fejlődési ütem lehetővé teszi azt, hogy a nagy értékű szerkezetek, létesítmények üzemeltethetőségi feltételeit, maradék élettartamát egyre nagyobb megbízhatósággal becsüljük, azaz integritását egyre kisebb kockázattal ítéljük meg.

Az előzőkből adódóan kialakult egy új, diszciplína, a „*szerkezetek integritása*”, vagy „*szerkezetintegritás*” fogalma és létrejött intézményrendszere szerte a világon. A döntően mérnöki ismereteket integráló tudományterület feladata annak eldöntése, hogy egy adott szerkezet, létesítmény milyen feltételek mellett üzemeltethető a továbbiakban, ill. mennyi a maradék élettartama és ez milyen módon menedzselhető. Ahhoz, hogy a szerkezet állapotát a lehető legnagyobb biztonsággal felmérhessük - ebből adódóan a további üzemeltethetőség feltételeit a legkisebb kockázattal megbecsüljük - elengedhetetlen az, hogy

- *diagnosztikai vizsgálatokkal felmérjük a szerkezet állapotát,*
- *tisztázzuk a valóságos üzemi körülményekre jellemző mechanikai állapotot,*
- *megítéljük a beépített anyagok károsodásának folyamatát és mértékét az adott üzemeltetési feltételek mellett.*

Nyilvánvaló egyrészt az, hogy az előzőekben említett három fő terület (méréstechnika - mechanika - anyag) egyforma jelentőséggel bír a szerkezet integritásának megítélésében és bármelyik terület elhanyagolása, súlyának csökkentése hibás döntéshez, esetleg katasztrófához vezethet. Nyilvánvaló másrészt az, hogy minden műszaki döntésben, így az üzemeltethetőség feltételeinek megítélésében is, bizonyos kockázat rejlik, hisz a tudomány adott szintjét hasznosítjuk és a rendelkezésre álló eszközpark maga is az adott kor színvonalát képviseli. Ebből

adódóan mérlegelni kell az esetleges hibás döntés műszaki, jogi, közgazdasági és környezetvédelmi következményeit. Ezek együttes figyelembevételével viszont már kialakíthatók az ésszerű kockázatvállalás feltételei.

A szerkezetintegritás tehát egy igen komplex terület. Akik ezt művelik azoknak képesnek kell lenniük arra, hogy az üzemelthezőséggel kapcsolatos problémákat teljes körűen átlássák, kiemeljék a meghatározó paramétereket, kérdéscsoportokat és alkalmasak legyenek arra, hogy az érintett tudományterületek szakembereivel érdemben szakmailag konzultálni tudjanak.

A szerkezetek integritásának, reális állapotának, maradék élettartamának megítélése mind az üzemeltetők, mind pedig a biztosítótársaságok alapvető érdeke. Az üzemeltető szempontjából a tudatos tervezés, fejlesztés megkerülhetetlen sarokpontja az üzemben levő készülékek műszaki állapota, biztonsága; a szükséges biztosítás tekintetében pedig az ésszerű kockázatvállalás, biztosítási összeg alapeleme a reális állapot ismerete. Ezek jelentőségét mérlegelve támogatta az Európai Unió a TEMPUS program keretében a „*Teaching and Education in Structural Integrity in Hungary*” címmel összeállított pályázatot, amelynek fő célkitűzése ezen új diszciplína meghonosításán kívül egyrészt a szerkezetintegritás oktatási anyagainak kidolgozása, másrészt a **Szerkezetintegritás - Biztosítási Mérnök Szakmérnöki Szak** beindítása. A négy hazai intézmény - Miskolci Egyetem, Budapesti Műszaki Egyetem, Kossuth Lajos Tudományegyetem Műszaki Kara és a Széchenyi István Műszaki Főiskola szakembereinek bevonásával elérendő célok megvalósítását nagyban segítették a következő külföldi partnereink:

- Prof. T. Varga, Bécsi Műszaki Egyetem, e fűzet társszerzője
- Prof. H. P. Rossmann, Bécsi Műszaki Egyetem
- Dr. J. Blauel, Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik
- Prof. S. Reale, Università Degli Studi di Firenze
- Prof. G. Pluinage, Universitz of Metz,
- Dr. S. Crutzen, Joint Research Centre, European Commission

Miskolc, 1999. augusztus 15.

Tóth László

egyetemi tanár
a projekt koordinátora

TARTALOMJEGYZÉK

3	
Előszó	1
1. Bevezetés	4
2. Fáradásos repedésterjedés leírása	4
3. Fáradásos repedésterjedésre ható tényezők	9
4. Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok és azok értékelése	11
4.1 Próbatestek	11
4.2 Vizsgálatvezetési módok (terhelési függvények)	13
4.3 A terjedő repedések méretének mérési módszerei	13
4.4 A fáradásos repedésterjedési sebesség meghatározásának módszerei	19
4.5. A vizsgálati eredmény meghatározása	20
4.6. Vizsgálatvezérlő szoftverek	21
4.7. Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok	21
4.8. A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredményei	22
5. Irodalomjegyzék	22
6. Jelölések jegyzéke	26

1. Bevezetés

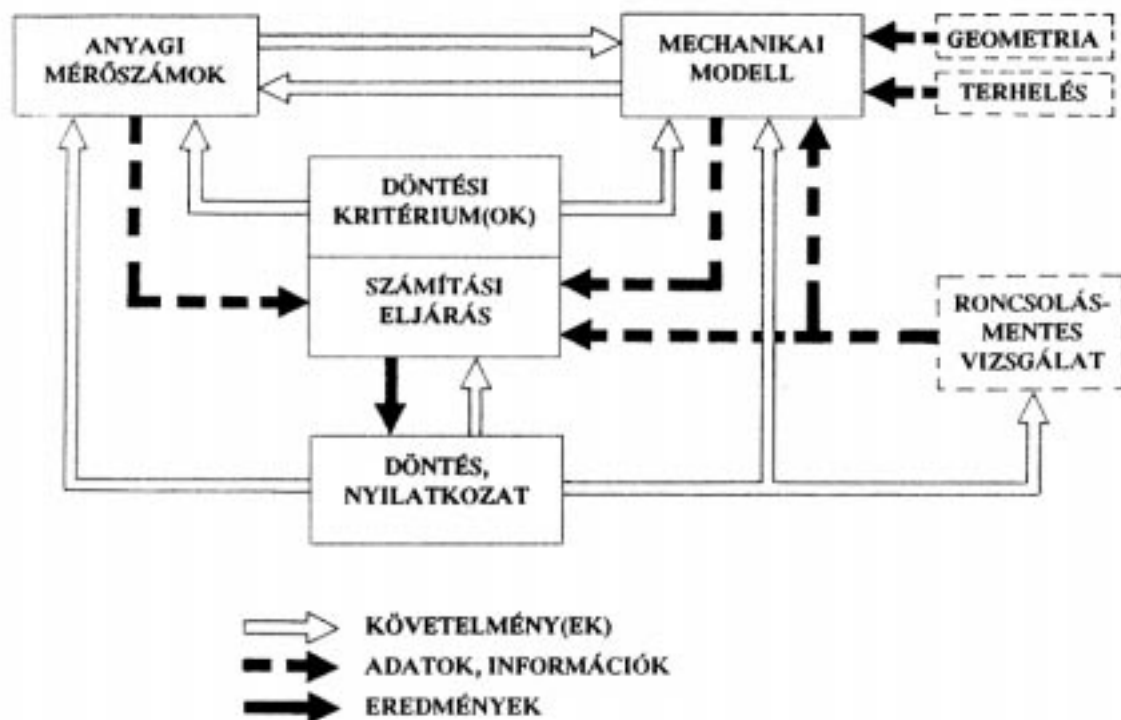
A gépészeti szerkezetek jelentős részét ma is jellemzően mechanikai igénybevételre, legtöbbször folyáshatárra méretezik, gyakorta nem pusztán statikus terhelések esetén is. Ez általában a tényleges mechanikai terhelés (és terhelési történet) számottevő egyszerűsítésével jár együtt, ami az adott szerkezet megbízhatóságát veszélyeztetheti. Az ismétlődő igénybevételű szerkezetek, különösen hegesztett szerkezetek esetében a fáradásos törés bekövetkezésének gyakorisága meghaladja a statikus törését, így e szerkezetek méretezése más koncepciót kíván. A klasszikus, Wöhler-görbén alapuló módszerek nem törekednek a károsodás, a tönkremeneteli folyamat követésére, hanem megengedett feszültségekkel számolnak. E feszültségek valamilyen törési (túlélési) valószínűséghez tartoznak, valamilyen kockázatvállalást tehát tükröznek, a szerkezetben lévő gyártási eredetű vagy üzemeltetés során keletkezett hibák figyelembevételére azonban nem alkalmasak. Ez indokolta a törésmechanikai szemléletmód előtérbe kerülését a legkülönbözőbb szerkezetek esetében.

A fáradásra való méretezésnek alapvetően két koncepciója ismeretes [1, 2, 3]. Az egyik, a biztos élettartamra való méretezés azt feltételezi, hogy a szerkezet, szerkezeti elem hibamentes, illetve ha tartalmaz hibát, akkor abból 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 vannak repedések, s ezek a repedések növekednek. Ezen elv szerint a szerkezetnek a hiba felfedezéséig, pontosabban a hiba sorsáról való döntés meghozataláig 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 [4, 5];
- a maximális tervezési (minimális fáradási) élettartam elérésekor végrehajtott szerkezeti elem cseréje esetén jelentős fel nem használt élettartam is elveszhet [2], 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 [6];
- 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 [7].

Egy ismétlődő igénybevételű szerkezet, szerkezeti elem fáradásos repedésterjedéssel szembeni ellenállásának megítélésére a tervezés vagy az üzemeltetés során kerülhet sor. Előbbi esetben feltételezett, utóbbi esetben valamilyen roncsolásmentes vizsgálattal kimutatott repedés, repedésszerű hiba veszélyességéről kell nyilatkozni. A felvetődő kérdések megválaszolására alkalmas élettartambecslő rendszer két alappillérre, az anyagot reprezentáló mérőszámokra és a szerkezetet, szerkezeti elemet, különösen a repedés környezetében megtestesítő mechanikai modellre támaszkodik [1, 8, 9]. E mellett figyelembe kell venni az alkalmazni kívánt, illetve alkalmazott roncsolásmentes vizsgálat megbízhatóságát, a hibák kimutathatóságát, stb. is [6, 10].

A rendszer elvi vázlatát és egyes elemeinek kapcsolatát az 1. ábra szemlélteti [1, 8, 9, 10].



1. ábra. Repedést tartalmazó, ismétlődő igénybevételű szerkezetek, szerkezeti elemek élettartambecslésének rendszere

Az ábrán látható rendszer működőképességének alapfeltétele, hogy elemei között valamelyik törésmechanikai elméleten nyugvó kapcsolat, összhang legyen. Ez az elmélet leggyakrabban a lineárisan rugalmas törésmechanika (LRTM) elmélete, a feszültségállapot leírására a repedéscsúcs környezetében pedig a feszültségintenzitási tényező tartományát (ΔK) használják [11, 12]. Ennek megfelelően az anyagi mérőszámok a fáradásos repedésterjedés kinetikai diagramjából származtathatók [13, 14], amely fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredménye.

2. A fáradásos repedésterjedés leírása

A fáradásos repedésterjedés leírására több modell ismert, amelyek közül még a leginkább elfogadott - a képlékeny tompulási folyamat [15] - sem teszi lehetővé a repedésterjedés maradéktalan mennyiségi tárgyalását. Ezért általában meg kell elégedni félempirikus, illetve empirikus összefüggések alkalmazásával, s a különböző megközelítések számos repedésterjedési törvény kidolgozását eredményezték. Tekintettel arra, hogy az időben változó, ismétlődő jellegű terhelés alapvetően kétféle lehet, állandó vagy a változó amplitúdójú, valamint arra, hogy utóbbi magában foglalja az egyszeri vagy periodikus túlterhelést, a lépcsős, a blokk és a véletlenszerű terhelést egyaránt a kép még színesebb. Nem véletlen tehát, hogy a különböző repedésterjedési törvények áttekintésére, összegyűjtésére több kísérlet történt [1, 16, 17]. Figyelembe véve azt, hogy a különböző terhelések elméleti leírása, szerkezetekre gyakorolt hatásainak megítélése, anyagvizsgálati metodikája meghatározó elemeiben különbözik [13], a továbbiakban az állandó amplitúdójú terhelésekre koncentrálunk.

Az összefüggések első csoportjába azok a formulák sorolhatók, amelyek a repedésterjedési sebesség (da/dN) - feszültség (σ) és/vagy repedésméret (a) kapcsolatot adják meg. Ezek egyszerűsített alakjai a következők:

$$\frac{da}{dN} = c_1 f(\sigma)^{k_1} \quad (1)$$

$$\frac{da}{dN} = c_2 f(\sigma)^{k_2} \quad (2)$$

$$\frac{da}{dN} = c_3 f(\sigma)^{k_3} f(a)^{k_4} . \quad (3)$$

A második csoportba azok az összefüggések tartoznak, amelyek a repedésterjedési sebesség - teljes vagy képlékeny nyílásamplitúdó (ϵ_a) és repedésméret kapcsolatát foglalják, az alábbi módon magukba:

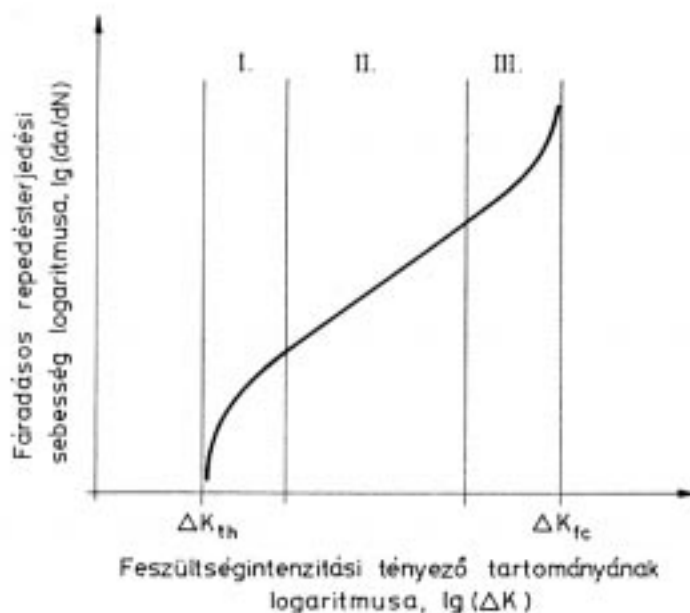
$$\frac{da}{dN} = c_4 f(\epsilon_a)^{k_5} f(a)^{k_6} . \quad (4)$$

Mindkét csoport összefüggései jellemzően az ilyen irányú kutatások kezdeti időszakának az eredményei. Legnagyobb hiányosságuk, hogy nem tartalmaznak olyan mennyiséget, amelyik jól jellemezné a repedéscsúcs környezetének mechanikai állapotát.

A harmadik, az előző kettőnél lényegesen nagyobb csoportba azok az összefüggések sorolhatók, amelyek a törésmechanikai szemléletmód terjedésének eredményei. A leggyakrabban alkalmazott, a feszültségintenzitási tényező tartományára épülő formula általános alakja a következő:

$$\frac{da}{dN} = c_5 f(\Delta K)^{k_7} . \quad (5)$$

Ezt kettős logaritmusos rendszerben ábrázolva a 2. ábrán látható jellegzetes görbét, a fáradásos repedésterjedés kinetikai diagramját kapjuk.



2. ábra. A fáradásos repedésterjedés kinetikai diagramja

A rövid repedések kérdéskörére itt nem kitérve, a diagramon három tartomány különíthető el. A I. tartomány a repedés lassú terjedésének szakasza, bal oldali érintője a feszültségintenzitási tényező tartományának küszöbértéke (ΔK_{th}), amely alatt a repedés még nem terjedőképes. A II. tartomány a repedés stabil növekedésének, a III. pedig a repedés terjedésének rohamosan gyorsuló tartománya. Utóbbi jobb oldali érintője a feszültségintenzitási tényező tartományának kritikus értéke vagy törési szívósság (ΔK_{fc}) [13, 14, 18].

A kinetikai diagramot leíró összefüggések annak alapján rendszerezhetők, hogy a három tartomány közül melyikben vagy melyikekben képesek a repedés viselkedését visszatükrözni. A

$$\frac{da}{dN} = C_m (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (6)$$

összefüggés Klesnil és Lukaš nevéhez köthető, a I. és II. tartományokban használható megbízhatóan [19]. A széles, talán a legszélesebb körben ismert és alkalmazott

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \quad (7)$$

formula, a Paris-Erdogan képlet [20] a középső szakaszra érvényes, míg a

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_p \Delta K^p}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (8)$$

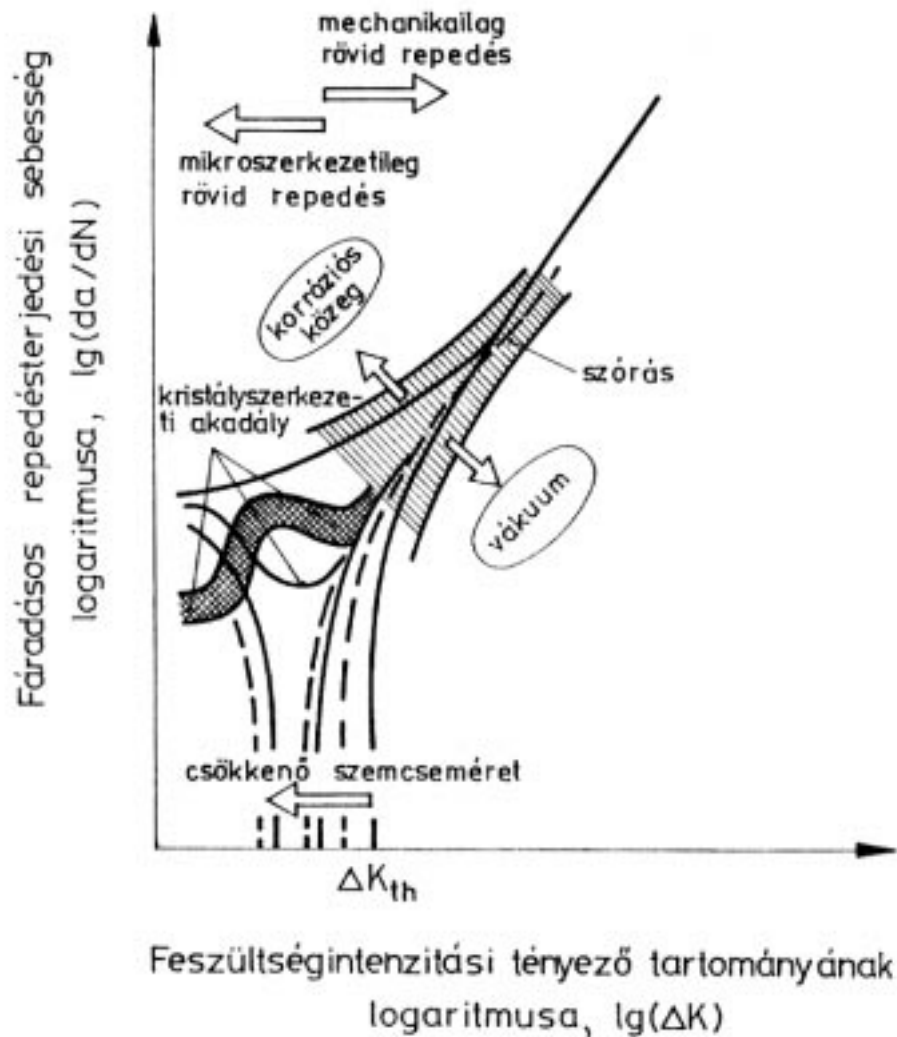
Forman összefüggés [21] a II. és III. tartományokban alkalmazható.

Formálisan a (7) összefüggés módosításának tekinthető a repedésterjedés repedészáródáson alapuló leírása. E jelenség felismerése, vagyis az, hogy a repedés nem a teljes terhelési ciklusban van nyitva, s ezért terjedéséért nem a teljes feszültségváltozás a felelős, Elber nevéhez fűződik [22]. A repedészáródás okai a repedés csúcsánál képlékenyen alakváltozott térfogatban visszamaradó feszültségek mellett a repedés csúcsában bekövetkező oxidációs folyamatokban, valamint a törési felület érdességében is kereshetők. A fáradásos repedésterjedési sebességet ilyenkor az effektív feszültségintenzitási tényező tartományának (ΔK_{eff}) függvényében írják le:

$$\frac{da}{dN} = C_E (U_E \Delta K)^n = C \Delta K_{eff}^n \quad (9)$$

Az U_E értékeire például a [23, 24] közleményekben található összefoglaló jellegű adatok, különböző anyagminőségekre.

A feszültségintenzitási tényező tartománya mellett további törésmechanikai mérőszámok - repedéskinyílás tartománya ($\Delta CTOD$), fajlagos energia-fel szabadulás tartománya (ΔG), J-integrál tartománya (ΔJ) - segítségével is leírható a fáradásos repedésterjedés [25, 26, 27]. Ezeket az összefüggéseket ma még nem alkalmazzák széles körben, az új (korszerű, különleges) anyagok elterjedése azonban valószínűsíthetően jövőbeni felhasználásukat.



3. ábra. Rövid fáradásos repedések viselkedése (elvi ábra)

Az előzőekben vázolt sok lehetőség és az ismert kritikai megjegyzések - az adatok teljes tartományára nem érvényes, önmagában nem fejezi ki a terhelés aszimmetria tényező (R) hatását [21] - ellenére a gyakorlatban leginkább a (7)-es, Paris-Erdogan összefüggést használják. Ennek oka éppen alkalmazási tartományában keresendő, mert a mérnöki szemléletet egyszerűen és kezelhető formában tükrözi vissza.

A kinetikai diagram kis repedésterjedési sebességekhez és kis feszültségintenzitási tényező tartományokhoz tartozó része a rövid (kis, kisméretű) repedések területe. E repedések viselkedése - amelyet a 3. ábra szemléltet - eltér a nagyobb repedések viselkedésétől, ezért az ott meghatározott törvényszerűségek nem, vagy csak módosításokkal alkalmazhatók [27].

A rövid repedések mérete abszolút számokkal nem definiálható. Megkülönböztethetünk a kritikus mikroszerkezeti mérettel megadható mikroszerkezeti rövid, valamint a képlékeny zóna méretét tekintve mechanikailag kicsi, a szerkezet jellemző méretét tekintve fizikailag rövid, valamint kémiai kis repedéseket [28, 29]. Ez azt is jelenti, hogy a rövid repedések vizsgálata különleges kísérleti technikát kíván, amelynek ismertetésére nem térünk ki. Utalunk viszont a ΔK_{th} fizikai tartalmának ellentmondásosságára, amely szorosan összefügg a rövid repedések problémakörével,

s amelynek feloldására például a [30] munkában található javaslat. E szerint értelmezhető mikroszerkezeti küszöbérték, s ilyenkor a hozzá tartozó repedésméret kisebb mint a szemcseméret, valamint definiálható mechanikai küszöbérték, ahol a repedésméret lényegesen nagyobb mint a szemcseméret (hagyományos értelmezés).

3. A fáradásos repedésterjedésre ható tényezők

A fáradásos repedésterjedést sok tényező befolyásolja, amelyek hatása a repedésterjedés kinetikai diagramján elkülönített három tartományban eltérő módon jelentkezik [11, 14, 31], ezért tartományonként külön-külön tárgyaljuk azokat.

A I. tartományban a ΔK_{th} értékét nagymértékben meghatározza a terhelés aszimmetria tényezője, a mikroszerkezet, a közeg és a terhelési frekvencia [31, 32, 33]. Ezek mellett kisebb a hatása az anyagvastagságnak, az orientációnak, a terhelés történetének a nem terjedő repedés eléréséig, továbbá a ΔK_{th} érték meghatározásakor alkalmazott kritériumnak [31, 34].

A terhelés aszimmetria tényezőjének növekedése a ΔK_{th} értékének csökkenését eredményezi, amely az alábbi összefüggés típusok segítségével számszerűsíthető:

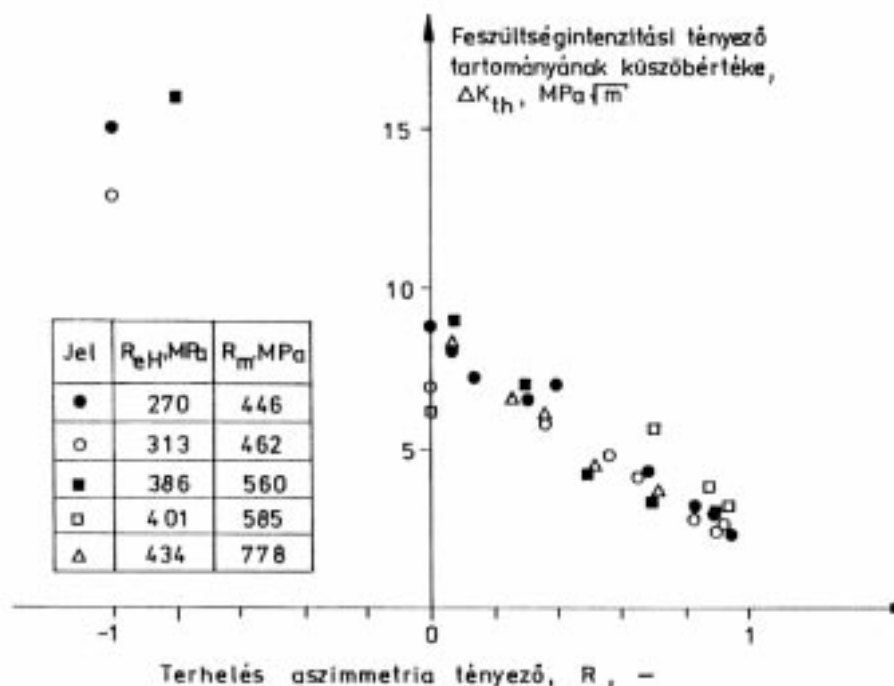
$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0} (1 - R)^\gamma, \tag{10}$$

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0} (1 - k R). \tag{11}$$

A képletekben szereplő ΔK_{th0} folyáshatártól való függését a

$$\Delta K_{th0} = 8,5 - 0,003 R_y \tag{12}$$

alakban számszerűsíti a [35] közlemény. A (10) és (11) összefüggésekkel bemutatott kapcsolatot, különböző folyáshatárú anyagminőségekre, [36] és [37] adatainak felhasználásával a 4. ábra szemléletei.



4. ábra. A terhelés aszimmetria tényezőjének hatása a ΔK_{th} értékére

A mikroszerkezet hatása a szemcseméret, továbbá a szövetszerkezet, illetve közvetetten a folyáshatár vagy a szakítószilárdság alapján ítélt meg [11, 31]. A szemcseméret, illetve az aszimmetria tényező és a szemcseméret hatásának számszerűsítésére alkalmas összefüggés típusok az alábbiak:

$$\Delta K_{th} = k_1 + k_2 d^{1/2}, \quad (13)$$

$$\Delta K_{th} = (1 - R)(k_3 + k_4 d^{1/2}). \quad (14)$$

A vizsgálati közeg hatása függ a közeg jellemzőitől (hőmérséklet, típus, tulajdonságok) és a repedésűcs környezetében lejátszódó folyamatoktól (közvetlen hatás), illetve a közeg hatására bekövetkező globális tulajdonságváltozásoktól (közvetett hatás). Ezek mellett a további paraméterekkel való kölcsönhatás is fontos, így nem véletlen, hogy a vizsgálati közeg hatásának megítélése ellentmondásos [17, 38].

A frekvencia növekedése, elsősorban a 100 Hz feletti tartományban, a ΔK_{th} érték csökkenését eredményezi [39]. Tekintettel a vizsgálatok nagy időigényére, törekvés a minél nagyobb vizsgálati frekvencia alkalmazása, így ezt a hatást az eredmények értékelésénél és felhasználásánál szem előtt kell tartani.

A fáradásos repedésterjedés II. tartományára számottevő hatása van a terhelési frekvenciának, szoros kapcsolatban a ciklusalakkal, és a közegnek [1, 38, 40]. Kisebb a hatása az aszimmetria tényezőnek, a mikroszerkezetnek és az anyagvastagságnak [31, 32, 33]. Az orientáció megítélése ellentmondásos, míg a próbatest elkészítésének, kezelésének módja statisztikusan nem befolyásolja a repedésterjedést.

A terhelési frekvencia növelése az alakváltozási folyamat lejátszódására rendelkezésre álló időt csökkenti, ezért a repedésterjedési sebesség is csökken [40]. Az ezt figyelembe vevő, a (7) összefüggést módosító formula típusa az alábbi [41]:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n f^{-\lambda}. \quad (15)$$

A hatás a dinamikus folyáshatár segítségével is számszerűsíthető [42]:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_\sigma}{\delta_y^{m_\sigma}} \Delta K^n. \quad (16)$$

A vizsgálati közeg agresszivitásának megfelelően növeli a repedésterjedési sebességet. Leglassúbb a repedésterjedés vákuumban, gyorsabb száraz levegőben, levegőben, számottevően gyorsabb tiszta vagy nedves gázokban, s még intenzívebb agresszív folyékony anyagokban [38, 40, 43]. A közeg hatása a nagyobb terhelési frekvenciák esetén kisebb, mert a repedésűcs környezetében lejátszódó folyamatokra kevesebb idő áll rendelkezésre.

A hőmérséklet növekedése általában növeli a repedésterjedési sebességet [17, 40], az anyagminőségtől függő magas hőmérsékleten számolni kell a fáradás és a kúszás kölcsönhatásával [40, 41]. E kölcsönhatást a terhelési frekvencia számottevően megváltoztatja, hiszen nagy frekvenciáknál a kúszási folyamatokra rendelkezésre álló idő kicsi és fordítva.

A fáradtsági függvény alakjának hatását annak alapján ítélni meg, hogy a maximális terhelés milyen hányadában hat a teljes terhelési ciklusnak, illetve milyen a terhelés fel- és lefutása a cikluson belül [40, 41, 44]. A hatás frekvenciafüggő és a számszerűsítésre alkalmas, a (7) összefüggést módosító formula típusa az alábbi [41]:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n f^{-\lambda} \delta^\omega. \quad (17)$$

A fáradásos repedésterjedés III. tartományával, a ciklikus törési szívóssággal, lényegesen kevesebbet foglalkoztak és foglalkoznak, mint a ΔK_{th} értékével, vagy a közepső szakasszal. Ennek oka elsősorban az, hogy a mérnöki gyakorlat számára ez a tartomány csekély jelentőségű. A ΔK_{fc} értékét nagymértékben befolyásolja a terhelés aszimmetria tényezője, a mikroszerkezet és az anyagvastagság, ugyanakkor kisebb a közeg hatása [11, 14, 31].

A ciklikus törési szívósság értéke általában eltér a statikus törési szívósságtól [17] és a terhelés aszimmetria tényezőjének növekedésével csökken. Az ezt kifejező összefüggés típusok az alábbiak:

$$\Delta K_{fc} = \frac{K_{Ic}}{1 + R}, \quad (18)$$

$$\Delta K_{fc} = (1 - R) K_{Ic}. \quad (19)$$

4. Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok és azok értékelése

A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok során mérni kell a terjedő repedés méretét (a), számlálni kell az igénybevételi ciklusok számát (N), majd számítani kell a fáradásos repedésterjedési sebességet (da/dN). Ennek birtokában, a feszültségintenzitási tényező tartománya (ΔK) segítségével megadható a fáradásos repedésterjedés kinetikai diagramja, illetve általában annak egy része (da/dN - ΔK), majd számíthatók az anyagi mérőszámok.

4.1. Próbatetek

A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokhoz leggyakrabban az 5. ábrán látható próbateteket alkalmazzák [45, 46, 47]:

- három ponton terhelt hajlító (TPB vagy 3PB);
- kompakt szakító (CT) próbatest;
- kör alakú, kompakt szakító (DCT) próbatest;
- ék alakú bemetszésű (WOL) próbatest;
- középen bemetszett szakító (MT) próbatest.

A feszültségintenzitási tényező tartományának számítására szolgáló összefüggés

$$\Delta K = \frac{\Delta F}{BW^{1/2}} Y\left(\frac{a}{W}\right) \quad (20)$$

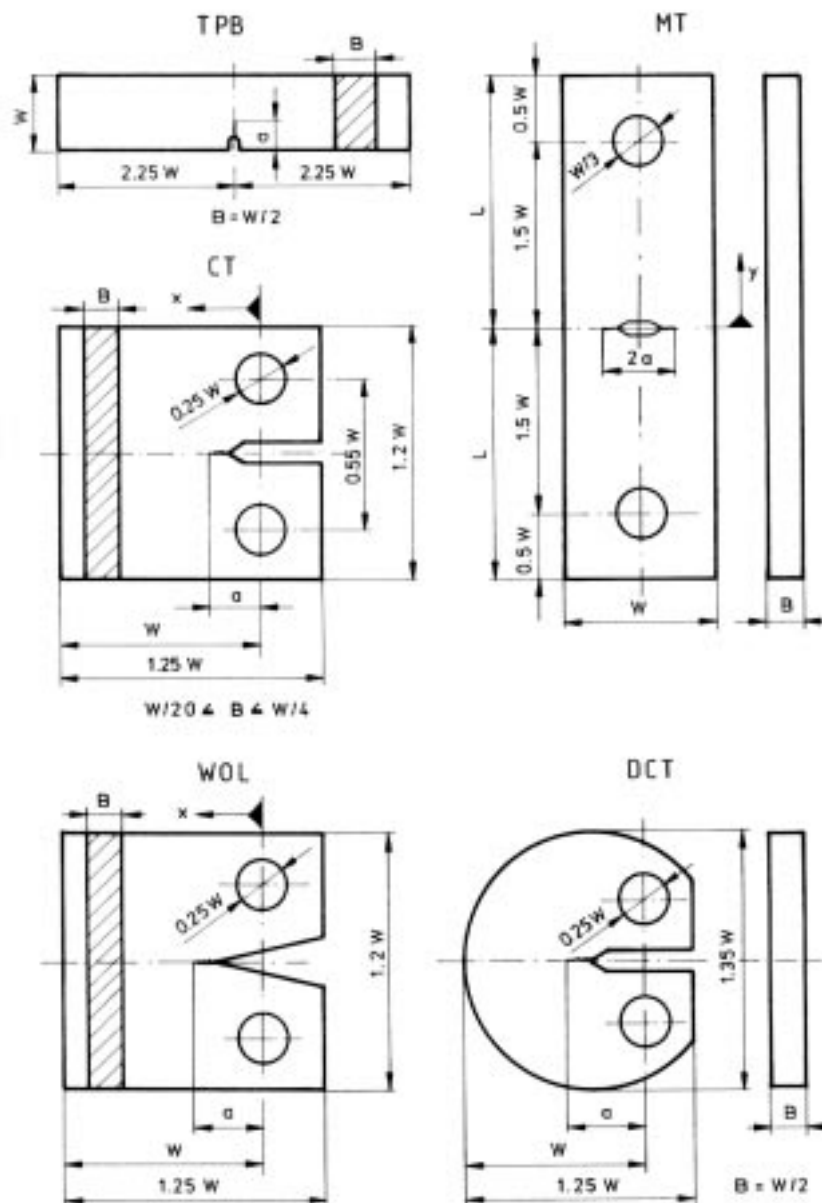
alakú, ahol a próbatestre jellemző állandó értékét a következőképpen kell meghatározni:

– TPB próbatestre [48] alapján

$$Y\left(\frac{a}{W}\right) = 6\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left[1.93 - 3.07\left(\frac{a}{W}\right) + 14.53\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 25.11\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 25.8\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]; \quad (21)$$

– CT próbatestre [45] szerint

$$Y\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2 + \left(\frac{a}{W}\right)}{\left[1 - \left(\frac{a}{W}\right)\right]^{3/2}} \left[0.886 + 4.64\left(\frac{a}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]; \quad (22)$$



5. ábra. A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatokhoz leggyakrabban alkalmazott próbatestek

– DCT próbatestre [46] alapján

$$Y\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2 + \left(\frac{a}{W}\right)}{\left[1 - \left(\frac{a}{W}\right)\right]^{3/2}} \left[0.76 + 4.8\left(\frac{a}{W}\right) - 11.58\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 11.43\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 4.08a\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]; \quad (23)$$

– WOL próbatestre szintén a [46] kézikönyvnek megfelelően

$$Y\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2 + \left(\frac{a}{W}\right)}{\left[1 - \left(\frac{a}{W}\right)\right]^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (24/a)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \left[0.8072 + 8.86\left(\frac{a}{W}\right) - 30.23\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 41.09\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 24.15\left(\frac{a}{W}\right)^4 + 4.951\left(\frac{a}{W}\right)^5 \right]; \quad (24/b)$$

– MT próbatestre pedig [45] szerint

$$Y\left(\frac{a}{W}\right) = \left[\Pi\left(\frac{a}{W}\right) \sec\left\{ \Pi\left(\frac{a}{W}\right) \right\} \right]^{1/2}. \quad (25)$$

A forgácsolt bemetszés alakjáról és méreteiről a [45, 47] előírások rendelkeznek, további próbatest típusokat a [14] és a [49] munkákban találhatunk.

4.2. Vizsgálatvezérlési módok (terhelési függvények)

A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatoknál leggyakrabban alkalmazott vizsgálatvezérlési módokat, lényegében terhelési függvényeket a 6. ábrán foglaljuk össze [45, 46, 50].

Említést érdemel, hogy egy-egy vizsgálatvezérlési mód több függvény szerint is megvalósítható. Például az R =állandó, K_{\max} és K_{\min} csökken eset vezérelt F lépcsők és vezérelt K lépcsők segítségével egyaránt realizálható [46].

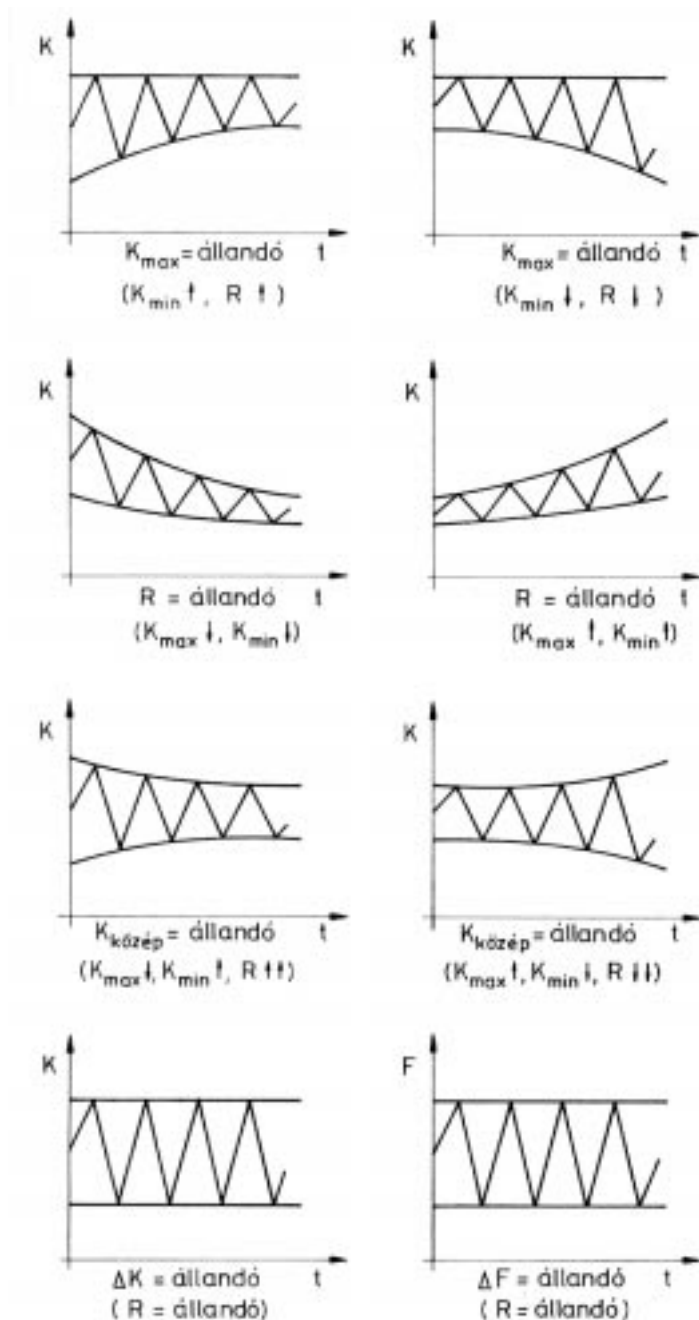
A 6. ábra alapján nyilvánvaló, mégis külön kiemeljük, hogy egyes esetekben a vizsgálat eredménye vizsgálati paraméter is lehet. Például a K_{\max} =állandó, K_{\min} csökken, vagyis R csökken (végeredményben tehát ΔK is csökken) esetben a vizsgálat végén kiadódó terhelés aszimmetria tényező egyúttal az elvégzett vizsgálat paraméterének is tekintendő.

4.3. A terjedő repedés méretének mérési módszerei

A terjedő repedés méretének mérésére különböző módszerek terjedtek el. Ennek okai az alábbiakban keresendők [51, 52]:

- a próbatestek (szerkezetek) anyaga, mérete különböző;
- a repedésméret meghatározásának igényelt pontossága eltérő;
- a repedésterjedés körülményei rendkívül változatosak (például hőmérséklet, közeg);
- a repedéskövetés automatizálása egyes esetekben szükséges;
- az adatfeldolgozás, adatkiértékelés metodikája eltérő.

A terjedő repedés méretének mérési módszerei két nagy csoportba sorolhatók, a felületi repedésméretet szolgáltató és az átlagos repedésméretet adó módszerek csoportjába [53, 54].



6. ábra. A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatoknál leggyakrabban alkalmazott vizsgálatvezérlési módok

Felületi repedésméretet szolgáltató módszerek:

- optikai módszer;
- repedésnövekedést mérő szenzor alkalmazása;
- villamos potenciáleséses módszer indirekt változata;
- örvényáramos módszer egyik változata.

Átlagos repedésméretet adó módszerek:

- compliance (reciprok rugóállandó/rugómerevség) módszer;
- villamos potenciáleséses módszer direkt változata;
- örvényáramos módszer másik változata;

- a terhelés aszimmetria tényezőjének változtatása;
- a próbatest hátfelületi összenyomódásának mérése (BFS);
- a repedéscsúcs környezete nyúlásának mérése (CTSM);
- ultrahangos módszer;
- akusztikus emissziós módszer;
- Barkhausen-zaj alapján mérő módszer;
- a repedésfront hevítéssel való elszínezése.

A felsorolt módszerek közül legszélesebb körben és leggyakrabban az optikai, a compliance és a villamos potenciáleséses módszert alkalmazzák, ezért a következőkben csak ezekre térünk ki. A többi módszer előnyei, hátrányai és alkalmazási területei a hivatkozott forrásokban megtalálhatók.

Az optikai módszerrel a repedésméret változását a próbatest felületére felvitt és/vagy az érzékelő eszközön rendelkezésre álló skála segítségével követhetjük. Ez történhet szabad szemmel vagy nagyítás útján, a próbatest egyik vagy mindkét oldalán. A nagyított, kétoldali repedéskövetés - különösen vastagabb próbatestek esetén - megbízhatóbb.

Az optikai módszer előnyei:

- egyszerűen kivitelezhető;
- nem igényel előzetes kalibrációt;
- a próbatest anyagának nem kell idealizált feltételeknek (például legyen lineárisan rugalmas) megfelelnie;
- a próbatest anyagának nem kell a vizsgálat fizikai elvéből adódó feltételeknek (például legyen ferromágneses) megfelelnie.

Az optikai módszer hátrányai:

- szubjektív elemeket hordoz;
- a próbatest felületét, a repedéscsúcs láthatósága érdekében, megfelelően elő kell készíteni;
- a felgyorsult folyamatok nehezen vagy alig követhetők;
- az automatikus adatrögzítés nem oldható meg.

A compliance módszer azon alapul, hogy a próbatest merevsége a repedés méretének változásával változik, ami kalibrációs görbe ismeretében felhasználható a repedés méretének meghatározására. Adott típusú és geometriájú próbatest esetén a mérés (kalibrálás) elrendezését, az erő-szétnyílás ($F-v_x$) függvény változását és a kalibrációs görbét a 7. ábra mutatja.

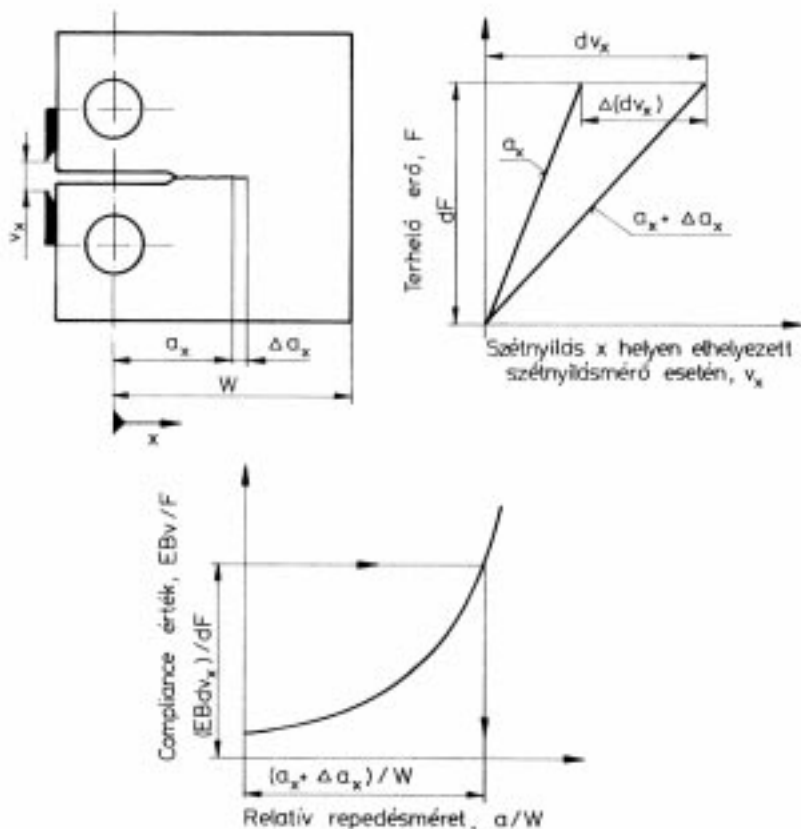
A pillanatnyi repedésméret TPB, CT, DCT és WOL próbatest vizsgálata során, egy adott (x) helyen elhelyezett szétnyílásmérő esetén, a próbatest jellemző mérete (W), vastagsága (B) és anyagának rugalmassági modulusa (E) ismeretében az

$$u_x = \frac{1}{\left(\frac{EBdv_x}{dF}\right)^{1/2} + 1} \quad (26)$$

mennyiségből az

$$\frac{a}{W} = c_0 + c_1 u_x + c_2 u_x^2 + c_3 u_x^3 + c_4 u_x^4 + c_5 u_x^5 \quad (27)$$

összefüggéssel határozható meg. A $c_0 \dots c_5$ állandók a próbatest típusától és a szétnyílásmérés helyétől függenek, a leggyakoribb esetekre vonatkozó értékeket az 1. táblázatban foglaltuk össze.



7. ábra. A terjedő repedés méretének mérése compliance módszerrel

1. táblázat

A compliance módszer alkalmazásához szükséges állandók (TPB, CT, WOL próbatest)

Próbatest	x/W	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	Forrás
TPB	-	0.99975	-3.9504	2.9821	-3.2141	51.516	-113.03	[46]
CT	-0.345	1.0012	-4.9165	23.057	-323.91	1798.3	-3513.2	[45]
	-0.33	0.9978	-5.1252	26.5929	-321.8754	1554.006	-2397.107	[55]
	-0.25	1.0010	-4.6695	18.460	-236.82	1214.9	-2143.6	[45]
	-0.1576	1.0008	-4.4473	15.400	-180.55	870.92	-1411.3	[45]
	0	1.0002	-4.0632	11.242	-106.04	464.33	-650.68	[45]
WOL	-0.329	1.0020	-5.1122	39.431	-751.19	4928.6	-10465	[46]
	-0.255	1.0021	-4.9472	35.749	-649.85	4110.9	-8410.8	[46]
	0	1.0004	-4.120	15.202	-228.94	1253.2	-2118.8	[46]

A pillanatnyi repedésméret MT próbatest vizsgálata során, a próbatest középvonalától adott (y) távolságra elhelyezett szétnyílásmérő esetén, az

$$x = 1 - \exp \left\{ \frac{- \left[EB \frac{dv_y}{dF} + \left(\frac{2y}{W} \right) \right] \left[EB \left(\frac{dv_y}{dF} \right) - \left(\frac{2y}{W} \right) + c_1 \left(\frac{2y}{W} \right) + c_2 \left(\frac{2y}{W} \right)^{c_3} \right]}{2.141} \right\} \quad (28)$$

mennyiségből a

$$\frac{2a}{W} = 1.06905x + 0.588106x^2 - 1.01885x^3 + 0.361691x^4 \quad (29)$$

összefüggéssel határozható meg. A c_1 , c_2 és c_3 állandókat a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat

A compliance módszer alkalmazásához szükséges állandók (MT próbatest)

L/W	Terhelésátadás (terhelési eset)	c_1	c_2	c_3	Forrás
2.0	állandó feszültség	0	0	0	[45]
1.5	furaton keresztül	0.005	0.0184	3.0	[45]
0.72	állandó elmozdulás	-0.03	0.013	4.0	[45]

A compliance módszer előnyei:

- különleges körülmények (például alacsony/magas hőmérséklet, közeg) között is viszonylag alacsony költségigényű;
- nincs szükség a próbatest vizuális megfigyelésére;
- könnyen automatizálható;
- számítógéppel vezérelt vizsgálatokhoz alkalmazható.

A compliance módszer hátrányai:

- kalibrálást igényel;
- a mérőeszköz sérülésveszélyes;
- nagyobb képlékeny alakváltozás, s így egyes anyagminőségek esetén nem megbízható.

A villamos potenciáleséses módszer során egyen- vagy változó áramot (I) vezetnek a próbatesten át, s mérik villamos ellenállásának változását a feszültségváltozás (U) segítségével. Az ellenállás a repedés növekedése során, az ép keresztmetszet csökkenése következtében változik, ami kalibrációs görbe segítségével alkalmas a repedés méretének meghatározására. A módszer direkt változata esetén a feszültségváltozást közvetlenül a próbatestenen mérik, indirekt változata esetén pedig a próbatestenre ragasztott fémfóliában. A két változat elrendezését és a direkt változatra jellemző kalibrációs görbét a 8. ábra szemlélteti.

A direkt villamos potenciáleséses módszer előnyei:

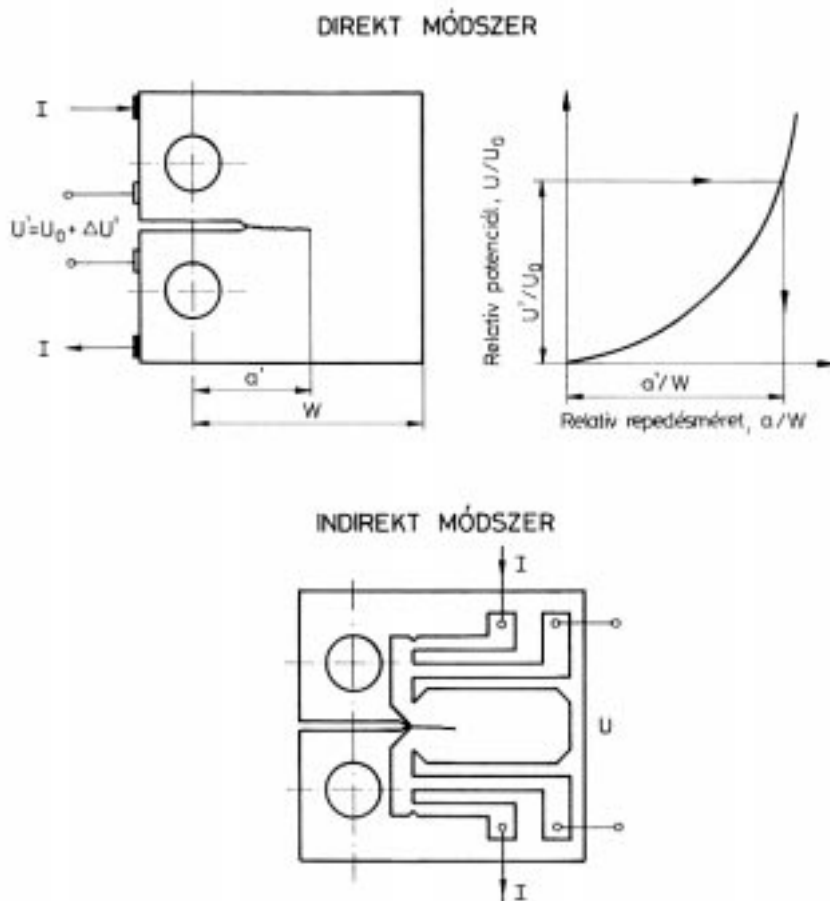
- viszonylag egyszerűen kivitelezhető;
- könnyen automatizálható;
- különleges körülmények között is alkalmazható;
- három dimenziós repedésfrontok esetén is alkalmazható.

A direkt villamos potenciáleséses módszer hátrányai:

- kalibrálást igényel;
- a próbatest villamos szigeteléséről gondoskodni kell;
- a mérést sok tényező befolyásolja.

Az indirekt változat legfőbb előnye, hogy villamosan nem vezető anyagok esetén is alkalmazható.

A terjedő repedés méretének mérésére alkalmas módszereket összevetve kijelenthető, hogy a próbatest (szerkezeti elem) alakjának, méretének, a vizsgálat körülményeinek stb. függvényében különböző módszerek alkalmazása lehet előnyös (optimális). Minden szituációra egyformán megfelelő módszer ebből következően nem ajánlható. A módszerek két nagy csoportját összehasonlítva megállapítható, hogy - az esetek jelentős részére jellemző nem egyenes repedésfrontból adódóan - az átlagos repedésméretet szolgáltató módszerek adnak megbízhatóbb eredményt. Különösen igaz ez aszimmetrikus repedésfrontok kialakulásakor, amelyek egyes esetekben elkerülhetetlenek (például hegesztett kötések vizsgálata).



8. ábra. A terjedő repedés méretének mérése villamos potenciáleséses módszerrel

4.4. A fáradásos repedésterjedési sebesség meghatározásának módszerei

A fáradásos repedésterjedési sebesség - a repedés méretének növekedése fárasztási ciklusonként - az összetartozó repedésméret - igénybevételi ciklusszám (a - N) adatok ismeretében határozható meg. Az alkalmazott módszerek három alapvető követelményt kell kielégítenie:

- a rendelkezésre álló a - N adatok teljes intervallumában legyen alkalmazható;
- a deriváltak (da/dN) legyenek fizikailag értelmezhetők;
- a módszer csak a valós különbségeket jelenítse meg, de azokat feltétlenül.

Az e követelményeket kielégítő módszerek három csoportba sorolhatók. Az első csoportba tartozók egy próbatesten vagy szerkezeti elemen elvégzett mérésből származó összes adatpárral dolgoznak, a második csoportba sorolhatók egy mérésből származó meghatározott számú adatpárral, lépegetve számolnak, míg a harmadik csoport módszerei több mérés összes adatpárját egyszerre dolgozzák fel.

A gyakorlatban legelterjedtebben a második csoportba tartozó módszereket alkalmazzák. Az első csoport módszerei a pontatlanság (például grafikus differenciálás) és a fizikai értelmezhetőség hiánya (például polinomos módszer [56]) miatt, míg a harmadik csoport módszerei a szokásosnál is nagyobb próbatest szám igény és az egyes mérések eredményeinek elvesztése miatt kevésbé használatosak.

A második csoportba sorolt módszerek az alapján különíthetők el, hogy az egyes deriváltak számításához hány adatpár szükséges. Így megkülönböztetünk 2, 3, 5, 7 és 11 (jellemzően tehát páratlan számú) pontos módszereket, amelyek mindegyike a felhasznált adatpárok számánál eggyel kisebb számú pontban nem ad eredményt. A 2 pontos módszer a véges differenciák módszere [45, 57], a 3 pontosak között pedig található véges differenciák, módosított differenciák, továbbá másodfokú polinommal való közelítésen alapuló módszer [52]. Az 5 pontos módszerek a 3 pontosakhoz hasonlóak [52], az [57] előírásban ismertetett azonban a részintervallumokon való közelítés mellőzésével, közvetlenül számítja a deriváltakat. A 7 és a 11 pontos módszerek a másodfokú polinommal való közelítésen alapulnak [45, 52]. A konkrét alkalmazásnál az adatpárok számának megválasztása két tényezőtől függ, a rendelkezésre álló repedésméret adatok átlagos lépésközétől, valamint a megjelenítendő különbségektől. A repedésméret átlagos lépésközének csökkenése a számított deriváltak bizonytalanságát növeli, ezért kis lépésköz esetén több adatpárt célszerű figyelembe venni, míg a valós különbségek kimutatása jellemzően kevesebb adatpárt igényel. Nem véletlen tehát, hogy a 2 és a 7 pontos módszerek terjedtek el széles körben, amelyeket [45] alapján mutatunk be.

A 2 pontos módszernél a repedésterjedési sebesség az

$$a_j = \frac{a_i + a_{i-1}}{2} \quad (30)$$

pontban az alábbi összefüggéssel számítható:

$$\left. \frac{da}{dN} \right|_{a_j} = \frac{a_i - a_{i-1}}{N_i - N_{i-1}}. \quad (31)$$

A 7 pontos módszernél az $a_{i-3} \leq a \leq a_{i+3}$ intervallumban érvényes közelítő függvény egyenlete:

$$a = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2, \quad (32)$$

ahol

$$C_1 = \frac{N_{i+3} + N_{i-3}}{2}, \quad (33)$$

$$C_2 = \frac{N_{i+3} - N_{i-3}}{2}. \quad (34)$$

A repedésterjedési sebesség a közelítő függvény N_i -hez tartozó a_i helyettesítési értékénél

$$\left. \frac{da}{dN} \right|_{a_i} = \frac{b_1}{C_2} + 2b_2 \frac{(N_i - C_1)}{C_2^2}. \quad (35)$$

Összehasonlítva a két módszert - valamint további módszereket - megállapítható, hogy összehangoltan megválasztott repedéskövetési technika, mintavételi és/vagy adatrögzítési lépésköz, továbbá körültekintően elvégzett vizsgálat esetén azok egyenértékű eredményt szolgáltatnak.

4.5. A vizsgálati eredmény meghatározása

A felszültségintenzitási tényező tartományának küszöbértéke (ΔK_{th}), a [45] előírás szerint, az alábbiaknak megfelelően határozható meg. A 10E-06-10E-07 mm/ciklus repedésterjedési sebességét tartományba, illetve annak közvetlen környezetébe eső legalább 5 $\log(da/dN)$ - $\log(\Delta K)$ adatpárra, a legkisebb négyzetek módszerével egyenest kell fektetni. A kiszámolt változatok közül a legjobban illeszkedő egyenest kell kiválasztani, majd meg kell határozni annak 10E-07 mm/ciklus repedésterjedési sebességhez tartozó helyettesítési értékét. Ez a helyettesítési érték az előírásnak megfelelő ΔK_{th} .

A fáradásos repedésterjedés kinetikai diagramjából elvben minden olyan formula származtatható, amely az (5) összefüggés szerinti. A gyakorlatban a leggyakrabban a (7) képlet szerinti Paris-Erdogan összefüggés paramétereit határozzák meg, a legkisebb négyzetek módszerével, lineáris regresszióval. A (7) egyenlet a

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = \log C + n \log(\Delta K) \quad (36)$$

alakra hozható, ami a $\log(da/dN)$ - $\log(\Delta K)$ rendszerben egy egyenes egyenlete. Ennek C és n paramétere, valamint a közelítés jóságáról informáló korrelációs együttható és/vagy korrelációs index az ismert módon számítható.

A ciklikus törési szívósság (ΔK_{fc}) a kritikus repedésméret segítségével a (20) összefüggésnek megfelelően határozható meg. A kritikus repedésméret köthető optikai vagy vizsgálatvezérlő szoftver segítségével mért repedésmérethez, pontosabb eredményt kaphatunk azonban akkor, ha az eltört próbatest töretfelületén mérjük azt. Az elérhető pontosság összhangban van azzal a jelentőséggel, amelyet a ΔK_{fc} érték hordoz.

4.6. Vizsgálatvezérlő szoftverek

Az anyagvizsgáló berendezések fejlődése eljutott abba a fázisba, hogy lehetővé vált a különböző vizsgálatok számítógépes vezérlése. Nincs ez másképp a fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok esetében sem, ahol szélesebb körben három rendszer terjedt el. Az MTS gyártmányú elektrohidraulikus berendezésekre a [46, 58], a RUMUL gyártmányú rezonancia fárasztó berendezésekre az [50], míg az INSTRON gyártmányú, szintén elektrohidraulikus berendezésekre az [59] kézikönyv ismerteti a részleteket. A kidolgozott rendszerek alapfilozófiája - annak ellenére, hogy azonos előírásra [45] épülnek - eltérő, s ebből következően eltérő azok anyagvizsgáló- és számítógépi reprezentációja is. Mindezek általában meg is határozzák alkalmazási lehetőségeiket és korlátaikat, végeredményben tehát alkalmazási területeiket. A három rendszer vonatkozó szoftverének legfontosabb tulajdonságait a [60] közlemény foglalja össze, így lehetőség van összehasonlításukra is.

4.7. Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok tervezése

A különböző előírások [45, 47, 57] és vizsgálatvezérlő szoftver leírások [46, 50, 58, 59] tartalmazzák a vizsgálatok tervezésére, előkészítésére, végrehajtására és kiértékelésére vonatkozó követelményeket, szabályokat és korlátokat. A következőkben olyan javaslatokat fogalmazunk meg, amelyek az említett forrásokban közvetlenül nem olvashatók, mégis hasznos információkat tartalmaznak.

- Az ismert sokféle próbatest típus közül a TPB és a CT próbatestek alkalmazását célszerű előtérbe helyezni.
- A próbatestek geometriáját a vizsgált termék gyakran meghatározza. Abban az esetben, ha van a vizsgálat tervezőjének mozgástere, akkor az anyagvizsgáló berendezés terhelhetősége és a terjedő repedés követelősége alapján alakítható ki kompromisszum.
- A forgácsolt bemetszést - a számító összefüggések érvényességi tartományát is figyelembe véve - a lehető legrövidebbre célszerű elkészíteni, mert ekkor kaphatunk a legszélesebb intervallumban eredményt.
- A próbatestek felületét a terjedő repedés követésére választott módszernek megfelelően kell előkészíteni, a felületes előkészítés lehetetlenné teheti a mérést, a túlzott előkészítés gazdaságtalan.
- A vizsgálat kezdetéhez tartozó terhelő erőt úgy célszerű megválasztani, hogy a 10 000-100 000 ciklus intervallumban terjedőképes repedésméret keletkezzen.
- A terhelési frekvenciát - ha egyéb megkötés nem akadályozza - a lehető legnagyobbra célszerű választani, úgy, hogy a mérési eredményt ez ne befolyásolja szignifikánsan.

- Számítógépes vizsgálatvezérlés és/vagy adatgyűjtés hiányában célszerű 0,1-0,5 mm-enként összetartozó a-N adatpárt rögzíteni, míg számítógépes vezérlés esetén nem célszerű ezt az intervallumot 0,1 mm-nél kisebbre választani, szokásos próbatest méretek esetén.
- A vizsgálatok kiértékelésénél (repedésterjedési sebesség meghatározása) célszerű a 2, az 5 vagy a 7 pontos módszerek, azok közül is elsősorban a 7 pontos módszer alkalmazása.
- A vizsgálati eredményeket célszerű az irodalmi adatokkal összevetni: ΔK_{th} értékek, ΔK_{th} -R függvények, n értékek, n-logC függvények, ΔK_{fc} értékek, K_{Ic} értékek.
- Az eredmények megbízhatóságának növelése érdekében kívánatos statisztikai minták (legalább 5, azonos körülmények között vizsgált próbatest) alkalmazása és a minták jellemzőinek (átlag, szórás, szórási együttható) számítása, továbbá irodalmi adatokkal való összehasonlítása.

4.8. A fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok eredményei

Számtalan közlemény tartalmaz fáradásos repedésterjedéssel, illetve elvégzett vizsgálatokkal kapcsolatos információkat, adatokat. Ezek összegyűjtése, összefoglalása ma már valószínűleg reménytelen feladat. Nem haszontalan viszont felhívni a figyelmet néhány olyan munkára, amelyben viszonylag sok és sokféle adat található. Ez segíti a vizsgálatok tervezését, a kapott eredmények értékelését, összehasonlítását egyaránt, sőt gyakran munka- és időigényes vizsgálatok elvégzését is szükségtelenné teszi.

A ΔK_{th} adatok legnagyobb gyűjteménye a [36] kézikönyv, majd annak folytatása, a [61] munka. A ΔK_{th} -R kapcsolatra (lásd (10) és (11) összefüggés) a [62, 63] közlemények közölnek adatokat, különböző anyagcsoportokra. A Paris-Erdogan összefüggés állandóit (C és n) gyűjtötték és foglalják össze a szerzők a [64] publikációban, a két állandó kapcsolatáról pedig a [14, 16, 45] munkákban olvashatunk, többek között. Sok információ és vizsgálati eredmény található még a [14, 18, 66, 67] közleményekben.

5. Irodalomjegyzék

- [1] HOEPPNER, D.W.; KRUPP, W.E.: Prediction of component life by application of fatigue crack growth knowledge. Engineering Fracture Mechanics, 1974, Vol. 6, p. 47-70.
- [2] PICKARD, A.C.: Component lifing. Materials Science and Technology, September, 1987, Vol. 3, p. 743-749.
- [3] RADAJ, D.: Assessment of fatigue strength of Welded structures based on local parameters. Fatigue design 1995, Helsinki, 5-8 September, 1995. Eds.: MARQUIS, G., SOLIN, J. Technical Research Centre of Finland, Espoo, 1995, Vol. III, p. 349-366.
- [4] ZSÁRY, Á.: Méretezés kifáradásra a gépészetben. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
- [5] EDEL, K.-O.: Mit Rissen leben? Zur Betriebssicherheit rissgeschädigter Bauteile. Fachhochschule Brandenburg-Hochschulreihe 1/93. Fachhochschule Brandenburg, 1993.

- [6] ROMVÁRI, P.; SPEIER, P.; TÓTH, L.: Varrathibák kimutathatóságát befolyásoló tényezők. V. Roncsolásmentes Anyagvizsgáló Szeminárium, Gyula, 1985. május 30-június 1. Különlenyomat, p. 1-9.
- [7] NOVOTNY, L.: A törésmechanika alkalmazása hegesztett nyomástartó edényekben lévő hibák megítélésére. Gép, (34), 1982/12. p. 473-479.
- [8] HOPKINS, S.W.; RAU, C.A.Jr.: Prediction of structural crack growth behavior under fatigue loading. Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis, ASTM STP 738. Eds.: HUDAK, S.J.Jr.; BUCCI, R.J. American Society for Testing and Materials, 1981. p. 255-270.
- [9] THEILING, H. et al.: Spannungsintensitätsfaktoren. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1987.
- [10] Merkblatt DVS 2401 Teil 2 (April 1989): Bruchmechanische Bewertung von Fehlern in Schweißverbindungen. Praktische Anwendung.
- [11] ALLEN, R.J.; BOOTH, G.S.; JUTLA, T.: 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, p. 45-69, 1988.
- [12] ALLEN, R.J.; BOOTH, G.S.; JUTLA, T.: 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, p. 71-108, 1988.
- [13] BROEK, D.: The practical use of fracture mechanics. Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [14] BLUMENAUER, H; PUSCH, G.: Technische Bruchmechanik. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig-Stuttgart, 1993.
- [15] LAIRD, C.: Influence of metallurgical structure on the mechanisms of fatigue crack propagation. Fatigue Crack Propagation, ASTM STP 415. American Society for Testing and Materials, 1967. p. 131-180.
- [16] ROMVÁRI, P.; TÓTH, L.; NAGY, GY.: Adalékok a fáradt repedés terjedési sebességét leíró összefüggésekhez. Gép, (32) 1980/9. p. 325-333.
- [17] TROSHHENKO, V.T.; POKROVSKIJJ, V.V.; PROKOPENKO, A.V.: Treshhinostojkost' metallov pri ciklicheskom nagruzhenii. Naukova, Dumka, Kiev, 1987.
- [18] CZOBOLY, E. et al.: Fémek és szerkezetek törése. Alkalmazott törésmechanika. Szerk.: ZOLNAY, G.; TÓTH, L. Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 1986.
- [19] KLESNIL, M.; LUKAŠ, P.: Effect of stress cycle asymmetry on fatigue crack growth. Materials Science and Engineering, 9 (1972), p. 231-240.
- [20] PARIS, P; ERDOGAN, F.: A critical analysis of crack propagation laws. Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, December 1963. p. 528-534.
- [21] FORMAN, R.G.; KEARNEY, V.E.; ENGLE, R.M.: Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures. Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, September 1967. p. 459-464.
- [22] ELBER, W.: The significance of fatigue crack closure. Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486. American Society for Testing and Materials, 1971. p. 230-242.
- [23] KUMAR, R.; SINGH, K.: Some formulae for the effective stress range ratio used in crack growth of 6063-T6 aluminium alloy. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 57 (1994) p. 311-319.

- [24] KUMAR, R.; SING, K.: Influence of stress ratio on fatigue crack growth in mild steels. *Engineering Fracture Mechanics*, 1995, Vol. 50, No. 3, p.377-384.
- [25] NOVOTNY, L.: A túlterhelés repedéskésleltető hatásának modellezése. *Gép*, (39) 1987/10. p. 368-374.
- [26] SHANG, J-K.: Interface fatigue crack growth in layered materials. *FATIGUE'96*, Berlin, 6-10 May 1996. Eds.: LÜJERING, G.; NOWACK, H. Pergamon, 1996, Vol. I, p. 43-54.
- [27] NOWACK, H.; SCHULTE, K; LÜTJERING, G.: Microscopical and mechanical contributions to the cycle by cycle crack growth under variable amplitude loading. *Fatigue Crack Growth under Variable Loading*. Eds.: PETIT, J. et al. Elsevier Science Publishers Ltd., 1988. p. 109-133.
- [28] SURESH, S.; RITCHIE, R.O.: Propagation of short fatigue cracks. *International Metals Reviews*, 1984, Vol. 29, No. 6, p. 445-476.
- [29] RITCHIE, R.O.; LANKFORD, J.: Small fatigue cracks: A statements of the problem and potential solutions. *Materials Science and Engineering*, 84 (1986), p. 11-16.
- [30] MILLER, K.J.: The two thresholds of fatigue behaviour. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 16, No. 9, p. 931-939, 1993.
- [31] LINDLEY, T.C.; NIX, K.J.: Metallurgical aspects of fatigue crack growth. 30 Years of Progress. *Proceedings of a Conference on Fatigue Crack Growth*, Cambridge, 20 September 1984. Ed.: SMITH, R.A. Pergamon, 1986. p. 53-74.
- [32] LAL, D.N.: A mechanistic model for the influence of stress ratio on the LEFM fatigue crack growth behavior of metals and alloys - I. Crack-ductile materials. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 49, No. 6, p. 871-897, 1994.
- [33] LAL, D.N.: A mechanistic model for the influence of stress ratio on the LEFM fatigue crack growth behavior of metals and alloys - II. Crack brittle materials. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 49, No. 6, p. 899-931, 1994.
- [34] BAO, H.; MCEVILY, A.J.: The effect of thickness on the rate of fatigue crack growth. *FATIGUE'96*, Berlin, 6-10 May 1996. Eds.: LÜTJERING, G.; NOWACK, H. Pergamon, 1996, Vol. I, p. 381-386.
- [35] LÜ, B.; ZHENG, X.: Prediction of fatigue crack growth rate in steels. *International Journal of Fracture*, 55:R21-R31, 1992.
- [36] TAYLOR, D.: A compendium of fatigue thresholds and growth rates. EMAS, Warley, 1985.
- [37] LUKÁCS, J.: Repedést tartalmazó hegesztett kötések megbízhatósága ismétlődő igénybevétel esetén. *Kandidátusi értekezés*, Miskolc-Budapest, 1992.
- [38] PETIT, J.; MENDEZ, J.: Some aspects of the influence of microstructure on fatigue. *FATIGUE'96*, Berlin, 6-10 May 1996. Eds.: LÜTJERING, G.; NOWACK, H. Pergamon, 1996, Vol. I, p. 15-26.
- [39] OGAWA, T.; TOKAJI, K; OCHI, S.: The influence of loading frequency on near-threshold fatigue crack growth. 2nd Conference of Asian-Pacific Congress on Strength Evaluation (APCS-86), Seoul, 3-5 July 1986. Seoul National University, 1986, p. 389-394.
- [40] GILLEMOT, F.: A fáradt repedés terjedési sebességét befolyásoló tényezők. *Gép*, (32) 1980/9. p. 333-337.
- [41] PLUMTREE, A.; SCHÄFER, S.: Waveform and frequency effect on the high temperature fatigue crack propagation rate of stainless steel. 6th International Conference on Fracture (ICF6), New Delhi, 4-10 December 1984. Eds.: VALLURI, S.R. et al. Pergamon, 1986, Vol. 3, p. 2249-2256.

- [42] NOACK, H.-G.; SEIFERT, K.: Frequency effects on crack propagation. International Conference on Analytical and Experimental Fracture Mechanics, Rome, 23-27 June 1980. Eds.: SIH, G.C.; MIRABILE, M. Sijthoff and Noordhoff, Alphen aan den Rijn, 1981. p. 365-374.
- [43] FERNANDES, P.J.L.; JONES, D.R.M.: The effects of loading variables on fatigue crack growth in liquid metal environments. FRACTURE'94, Johannesburg, 23-24 November 1994. University of the Witwatersrand, Johannesburg, 1994.
- [44] PLUMTREE, A.; SCHUCHTÁR, E.: High temperature fatigue crack propagation - ramp time effects. 9th Congress on Material Testing, Budapest, 1986. szeptember 29-október 3. Ed.: CZOBOLY, E. Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, 1986, Vol. I, p. 19-23.
- [45] ASTM E 647 - 1993: Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates.
- [46] 759 Testware, 759.40: Crack growth test. MTS Systems Corporation, Software Version 1.03A. MTS Document Number: 115725-03A. Minneapolis, Minnesota, 1990.
- [47] MSZ 6855/2-1988: FÉMEK TÖRÉSMECHANIKAI VIZSGÁLATA. Általános vizsgálati előírások.
- [48] MSZ6855/3-1988:FÉMEK TÖRÉSMECHANIKAI VIZSGÁLATA. A K_{Ic} törési szívósság meghatározása.
- [49] Stress intensity factors handbook. Ed.: MURAKAMI, Y. Pergamon, 1987.
- [50] Bedienungshandbuch zum RUMUL - Software Paket. RUMUL Russenberger Prüfmaschinen AG, Neuhausen am Rheinfall, 1993.
- [51] SCHWALBE, K.-H.: Test techniques. 5th International Conference on Fracture (ICF5), Cannes, 29 March-3 April 1981. Ed.: FRANCOIS, D. Pergamon, 1981, Advances in Fracture Research, Vol. 4, p. 1421-1446.
- [52] Metals Handbook. Ninth Edition. Volume 8. Mechanical Testing. American Society for Metals, 1985.
- [53] The measurement of crack length and shape during fracture and fatigue. Ed.: BEEVERS, C.J. EMAS, Warley, 1980.
- [54] Fatigue crack measurement: techniques and applications. Eds.: MARSH, K.J.; SMITH, R.A.; RITCHIE, R.O. EMAS, Warley, 1991.
- [55] NAGY, GY.; LUKÁCS, J.: A terjedő repedés méretének mérési módszerei és a compliance módszer megbízhatósága fáradásos repedésterjedéskor. Anyagvizsgálók lapja, (3) 1993/2. p. 41-43.
- [56] DAVIES, K.B.; FEDDERSEN, C.E.: Evaluation of fatigue crack growth rates by polynomial curve fitting. International Journal of Fracture, 9 (1973), p. 116-118.
- [57] Metodicheskie ukazaniya. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Opredelnie kharakteristik treshhinostojkosti (vjazkosti razrusheniya) pri ciklicheskom nagruzenii. RD 50-345-82.
- [58] 759 TestWare, 759.40: Crack growth test. MTS Systems Corporation, Software Version 1.02A. MTS Document Numbes: 115725-02A. Minneapolis, Minnesota, 1988.
- [59] Instron 2490 Series Application Program. Crack propagation program, Cat. No. 2490-085. Manual No. M22-12490-10. Instron Corporation, 1989.
- [60] LUKÁCS, J.: Fáradásos repedésterjedési sebesség vizsgálatok számítógépes vezérlése és értékelése. microCAD'95, Miskolc-Egyetemváros, 1995. február 23. Miskolci Egyetem, 1995, c: Anyagtudomány, p. 93-98.

- [61] Sourcebook on fatigue crack propagation: thresholds and crack closure. Eds.: TAYLOR, D.; JIANCHUN, L. EMAS, Warley, 1993.
- [62] VASUDEVAN, A.K.; SADANANDA, K.: Fatigue crack growth in advanced materials. FATIGUE'96, Berlin, 6-10 May 1996. Eds.: LÜTJERING, G.; NOWACK, H. Pergamon, 1996. Vol. I, p. 473-478.
- [63] KOBAYASHI, Y.; SHIBUSAWA, T.; ISHIKAWA, K.: Fatigue crack propagation behavior of magnesium-aluminium alloy in air and argon. FATIGUE'96, Berlin, 6-10 May 1996. Eds.: LÜTJERING, G.; NOWACK, H. Pergamon, 1996. Vol. I, p. 703-708.
- [64] TÓTH, L.; NAGY, GY.; RÓZSAHEGYI, P.: Az anyagok fáradásos repedés terjedésével szembeni ellenállása. Adatbank. IV. Országos Törésmechanikai Szeminárium, Miskolc-Lillafüred, 1991. április 10-12. Szerk.: TÓTH, L. Miskolci Egyetem, Miskolc, 1991. Melléklet.
- [65] IOST, A.: The effect of load ratio on the m-lnC relationship. International Journal of Fatigue, 13, No. 1, January 1991, p. 25-33.
- [66] Bruchmechanische Werkstoffcharakterisierung. Hrsg.: BLUMENAUER, H. Deutsches Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1991.
- [67] LUKÁCS, J.: Fatigue crack propagation in steels and their Welded joints. Publications of the University of Miskolc, Series C. Mechanical Engineering, Vol. 46. (1996) No. 1. p. 77-91.

6. Jelölések jegyzéke

Tekintettel arra, hogy e részben csak I (nyitó) terhelésmóddal foglalkozunk, a törési szívósság (K_{Ic}) kivételével a I alsó index használatától - a vonatkozó helyeken - eltekintünk.

a, 2a	repedésméret, mm
a_{fc}	kritikus vagy ΔK_{fc} -hez tartozó repedésméret, mm
a/W	relatív repedésméret
$b_i(i=0,1,2)$	állandók
B	próbatest vastagság, mm
$c_i(i=0,\dots,5)$	állandók
C	a Paris-Erdogan összefüggés állandója
$\Delta CTOD$	a repedéskinyílás tartománya, mm
C_m	a Klesnil-Lukaš összefüggés állandója
C_p	a Forman összefüggés állandója
C_E	az Elber összefüggés állandója
C_σ	állandó
$c_i(i=1,2)$	állandók
d	szemcseméret, mm
da/dN	fáradásos repedésterjedési sebesség, mm/ciklus
E	húzó rugalmassági modulusz, MPa
f	terhelési frekvencia, Hz
F	terhelő erő, N
ΔF	a terhelő erő tartománya, N
ΔG	a fajlagos energiafelszabadulás tartománya, J/mm ²
I	áramerősség, A

ΔJ	a J-integrál tartománya, kJ/m^2
$k_i (i=1, \dots, 7)$	állandók
K	feszültségintenzitási tényező, $\text{MPa m}^{1/2}$
K_c	a ciklikus törési szívóssághoz tartozó maximális feszültségintenzitási tényező (Forman összefüggés) $\text{MPa m}^{1/2}$
K_{\max}	maximális feszültségintenzitási tényező, $\text{MPa m}^{1/2}$
K_{\min}	minimális feszültségintenzitási tényező, $\text{MPa m}^{1/2}$
K_{Ic}	törési szívósság a I (nyitó) terhelésmódban, $\text{MPa m}^{1/2}$
ΔK	a feszültségintenzitási tényező tartománya, $\text{MPa m}^{1/2}$
ΔK_{eff}	az effektív feszültségintenzitási tényező tartománya, $\text{MPa m}^{1/2}$
ΔK_{fc}	ciklikus törési szívósság, $\text{MPa m}^{1/2}$
ΔK_{th}	a feszültségintenzitási tényező tartományának küszöbértéke, $\text{MPa m}^{1/2}$
ΔK_{th0}	a feszültségintenzitási tényező tartományának küszöbértéke ($R=0$) $\text{MPa m}^{1/2}$
L	a próbatest hosszúságának fele (MT próbatest), mm
m	a Klesnil-Lukaš összefüggés kitevője
m_σ	állandó
n	a Paris-Erdogan összefüggés kitevője
N	igénybevételi ciklusszám, ciklus
p	a Forman összefüggés kitevője
R	terhelés aszimmetria tényező
R_y	felső folyáshatár vagy terhelt állapotban mért egyezményes folyáshatár, MPa
u_x	segédváltozó a repedésméret számításához (compliance módszer)
U'	villamos potenciál, V
U_E	az Elber összefüggésben szereplő állandó
v_x	szétnyílás x helyen elhelyezett szétnyílásmérő esetén, mm
W	a próbatest jellemző mérete, mm
x	koordináta, mm
y	koordináta, mm
Y	geometriai függvény
γ	állandó
δ	a terhelési ciklus alakját kifejező változó, a felfutási idő és a lefutási idő hányadosa
ε_a	teljes alakváltozás amplitúdó
λ	állandó
σ	terhelési függvény, MPa
σ_y	dinamikus folyáshatár, MPa
ω	állandó