

TÖRÉSMECHANIKA

FRACTURE MECHANICS

Repedés terjedési érzékenység index

Index of crack propagation sensitivity

SZÚCS Nóra*, TÓTH László**, SZÁVAI Szabolcs*

Kulcsszavak: roncsolásmentes vizsgálat, feszültségintenzitási tényező, repedésterjedési érzékenység
Keywords: non-destructive evaluations, stress intensity factor, crack propagation sensitivity

Summary

The determination of stress intensity factor index is very important, because the non-destructive tests, the loading state and the crack propagation sensitivity are in close relation to fracture mechanical behaviour of the structure. In the case of quasi statical load of structural parts the crack propagation sensitivity index is available for the comparison of different cracks. The calculation of dK/da deriviate of different structural parts and cracks were prepared as well as computer software.

Bevezetés

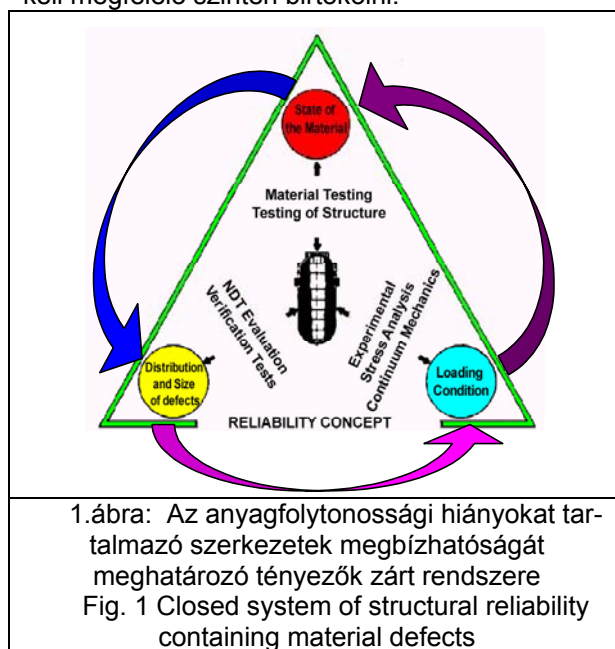
A mikroelektronika robbanásszerű fejlődésének természetes következménye, hogy a roncsolásmentes vizsgálatok területén újabb és újabb készülékek, berendezések jelennek meg egyre olcsóbban. A szerkezetek méretezésénél minden esetben azt feltételezzük, hogy azok anyagfolytonossági hiányoktól mentesek. Ez azonban nem azt jelenti, még a leggondosabb gyártás esetén sem, hogy a méretezésnél megadott kritériumok – azaz anyagfolytonossági hiány nincs a szerkezetben - maradéktalanul teljesülnek. Ezt a feltételezést csak erősítik a roncsolásmentes vizsgálat eredményei, mely a gyors fejlődésnek köszönhetően egyre korszerűbb készülékekkel egyre kisebb folytonossági hiányok mutathatók ki. Ha viszont bármilyen hibát észlelünk, a szerkezet megbízhatóságáról, üzemeltethetőség feltételeiről nyilatkoznunk kell. Ahhoz hogy ezt maradéktalanul megtehessek, a következőket kell figyelembe venni:

- A hibák méretét, elhelyezkedését, eloszlását,
- A hibák környezetében ébredő lokális terheléseket, valamint
- Az anyagnak a repedés terjedésével szembeni ellenállását az adott helyen.

* Bay Zoltán Alkalmazott Logisztikai és Gyártástechnikai Intézet

* Dr. Bay Zoltán Alkalmazott Logisztikai és Gyártástechnikai Intézet

Ezek együttesen, egyidejűleg határozzák meg a szerkezetek megbízhatóságát, mint ahogy azt az 1. ábra szemlélteti. Az 1. ábrát tekintve az is nyilvánvaló, hogy az anyagfolytonossági hiányokat tartalmazó szerkezetek megbízhatóságáról érdemben csak az képes nyilatkozni, aki kellő jártassággal rendelkezik, mind a roncsolásmentes, mind az anyagok repedésterjedéssel szembeni ellenállásának meghatározásánál alkalmazott (törés)mechanikai vizsgálatok, mind pedig a kísérleti feszültséganalízis területén. A mikroelektronika rohamos fejlődésével olyan új roncsolásmentes vizsgálati eszközök jelentek meg, és terjedtek el, amelyek egyre kisebb és kisebb méretű anyagfolytonossági hiányokat képesek egyre nagyobb és nagyobb reprodukálhatósággal, megbízhatósággal kimutatni. Mindkét kiemelt tény egyértelművé teszi azt, hogy mind a roncsolásmentes vizsgálatot végző, mind pedig annak eredményei alapján az üzemeltethetőség feltételeit, a szerkezetek integrálását meghatározó szakemberek, szakértők munkája egyre inkább előtérbe kerül. Ahhoz hogy minimálisra lehessen csökkenteni a döntések kockázatát a következő - 1. ábrán feltüntetett szakterületek ismeretanyagát kell megfelelő szinten birtokolni:



1. ábra: Az anyagfolytonossági hiányokat tartalmazó szerkezetek megbízhatóságát meghatározó tényezők zárt rendszere
 Fig. 1 Closed system of structural reliability containing material defects

- Anyagtudomány (az anyag tulajdonságainak az üzemeltetés során végbemenő változások meghatározására)
- Kontinuummechanika (numerikus módszerek alkalmazása az üzemi alkalmazások során kialakuló lokális feszültségek, törésmechanikai paraméterek számítására)
- Roncsolásos, ill. roncsolásmentes vizsgálatok alkalmazása, azok reprodukálhatósága

Amennyiben bármely tudományterület szakértői ismerete hiányos, a hibás döntés valószínűsége rohamosan növekszik. Ezért az anyag szerkezeti jellemzőit, a terhelési állapotokat, és a roncsolásmentes vizsgálatokat egyidejűleg kell figyelembe venni.

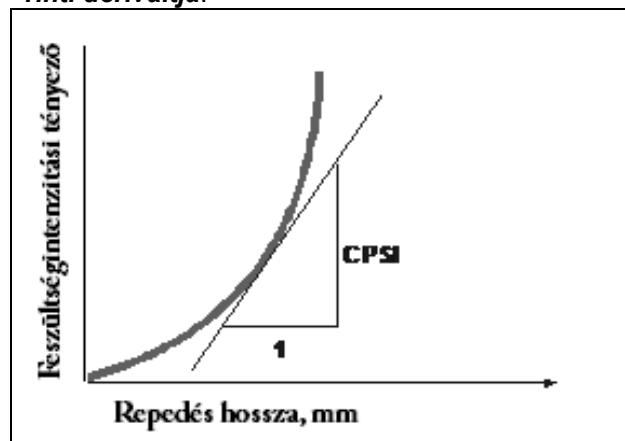
Az anyagok repedés megindulásával szembeni ellenállása próbatesteken végzett vizsgálatokkal meghatározhatók, vagyis a biztonsági tényező értéke számítható a repedés figyelembevételével. A roncsolásmentes vizsgálattal egy vagy több repedést, repedésszerű hibát észlelünk, felmerül a kérdés, hogy vajon egy-egy hiba mennyire veszélyes, és több hiba esetén melyik, és hányszor veszélyesebb? Ezt a koncepciót alkalmazva a különböző hibák veszélyességét pusztán számokkal hasonlíthatjuk össze, azaz mondhatjuk, hogy ez a hiba példának okáért háromszor veszélyesebb, mint a másik. A szerkezeti elemek repedés terjedés érzékenységi mutatójának definiálása alapvető fontosságú, mivel a roncsolásmentes vizsgálat, a terhelési állapot, valamint a repedés-terjedéssel szembeni ellenállása kapcsolatban van a szerkezetek megbízhatóságának értékelésekor alkalmazott törésmechanikai elvekkel.

Repedés terjedési érzékenység index kvázistatikus terhelésű szerkezeti elemek esetén

A folytonossági hiányok közül a repedésszerű hibák a legveszélyesebbek. Ezek környezetében kialakuló viszonyok, a törésmechanikai elvek alkalmazásával, invariáns mennyiségekkel leírhatók (pl. feszültségintenzitási tényező, J-integrál, repedés kinyílás). A kvázistatikus terhelésű szerkezeti elemek repedés terjedés érzékenység indexe a K (feszültségintenzitási tényező) függvény a (repedés hossza) szerinti deriváltja. Ezt a 2. ábra szemlélteti.

A kvázistatikus terhelésű szerkezeteknél a repedésszerű hiba környezetében kialakuló viszonyok jól jellemezhetők azon törésmechanikai mennyiségekkel, amelyek magukba foglalják a szerkezeti elem terhelését, geometriáját, a hibák alakját, méretét és elhelyezkedését, valamint az anyag jellemző tulajdonságait. Ha az anyag rideg, azaz a repedés csúcs környezetében is jó közelítéssel érvényes a rugalmas anyagegyenlet, akkor

a feszültségintenzitási tényező ez a mennyiség, amennyiben az anyag nem teljesen rideg, akkor pl. a J-integrál alkalmas a kialakuló viszonyok jellemzésére. A feszültségintenzitási tényező az anyagjellemzők közül csak a rugalmassági moduluszt tartalmazza, ezért a legkülönbözőbb kialakítású és terhelésű szerkezeti elemekben számítható. A 2. ábra egy adott terhelésű, adott geometriájú elemben kialakuló feszültségintenzitási tényező változásának a jellegét szemlélteti a repedés hosszának függvényében. A görbe bármely pontjába húzott érintő, a görbe deriváltja, azt fejezi ki, hogy a repedés hossz egységnyi megváltozásával milyen mértékben változik meg a feszültségintenzitási tényező értéke. Abban az esetben, ha ez a változás nagy, akkor a repedés veszélyes, hisz kismértékű repedésnövekedés a biztonság nagymértékű csökkenésével jár. Ha e változás csekély, akkor az adott hosszúságú repedés nem annyira veszélyes. A derivált maga, tehát alkalmas az adott repedés veszélyességének mérlegelésére és a repedések különböző feltételek közötti veszélyességének összehasonlítására. Abban az esetben ugyanis, ha a két különböző feltétel között (pl. két szerkezeti elemben, vagy adott elem két különböző helyén levő eltérő hosszúságú repedések) a repedések környezetében kialakuló feszültségintenzitási tényezők deriváltjai azonosak, azaz a két repedés veszélyessége teljesen azonos. Az előzőek alapján tehát definiálható a **kvázistatikus terhelésű szerkezeti elemek repedés terjedési érzékenységének indexe = a feszültségintenzitási tényező, vagy egyéb törésmechanikai mennyiség repedéshossz szerinti deriváltja.**

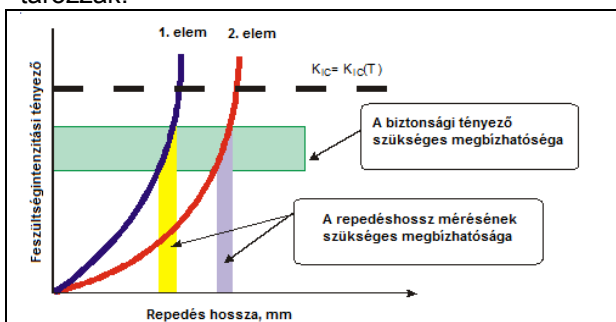


2. ábra: Repedés terjedés érzékenységi index definiálása kvázistatikus terhelés esetén
Fig. 2. Crack propagation sensitivity index in case of quasi static loads

A szerkezeti elemek repedésterjedési érzékenységét és a feszültségintenzitási tényező nagyságát ugyanazok paraméterek befolyásolják. A terheléssel, a feszültség nagyságával egyenes arányos mind a feszültségintenzitási tényező,

mind pedig a repedésterjedési érzékenység, azaz kétszeres terheléshez tartozó repedésterjedési érzékenysége is kétszeres. A repedéshossz növekedésével a repedésterjedési érzékenység növekszik (kivéve a peremen befogott, állandó elmozdulású elemeknél, amelynél ez csökken).

A 3. ábra egyértelmű útmutatást ad a roncsolásmentes vizsgálattal szemben támasztott követelményrendszer kidolgozásának elveire. Ehhez két különböző, de azonos anyagból készült szerkezeti elemet hasonlítottunk össze. Egyértelműen látható, hogy abban az esetben, ha a két elem terhelhetőségének becslésénél azonos biztonsági tényezőt akarunk elérni a roncsolásmentes vizsgálat eredményeire nézve teljesen eltérő előírásokat kell tennünk. Ugyanezt mondhatjuk fordítva is, azaz abban az esetben, ha a repedéshossz mérésénél egy adott hibát, bizonytalanságot követünk el, annak a teherbírásra, annak bizonytalanságára gyakorolt hatása függ a szerkezeti elemtől, annak terhelésétől a repedésszerű hiba helyétől, geometriájától, azaz mindazon paraméterektől, amelyek a feszültségintenzitási tényező (vagy más törésmechanikai paraméter) értékét meghatározzák.



3. ábra: A szerkezeti elemek repedésterjedési érzékenységének és a roncsolásmentes vizsgálati eredmények reprodukálhatóságának kapcsolata

Fig. 3. Relationship between crack propagation sensitivity index and reproducibility of NDT

A 3. ábrán nyomon követhető az anyag repedés terjedéssel szembeni ellenállásának (pl.: törési szívósságának), annak pl. a hőmérséklet változásának hatása is. Amennyiben a két elem maradék élettartamának becslésénél azonos biztonságot (bizonytalanságot) akarunk elérni, úgy a repedéshosszak mérésénél jelentősen eltérő bizonytalanságot engedhetünk meg.

Az előzőekből nyilvánvalóan következik, hogy

- A roncsolásmentes vizsgálatok eredményeinek reprodukálhatósága és ennek a szerkezeti elem terhelhetőségének bizonytalanságára gyakorolt hatása egyértelműen összekapcsolható

- A mechanikai vizsgálatok (repedésterjedéssel szembeni ellenállását tükröző anyagjellemzők) eredményeinek bizonytalansága okozta hatások szintén teljes egészében számíthatók

Számos kézikönyv, cikk [1-13] és software [3] létezik, amely különböző szerkezeti elemek feszültségintenzitási tényezőinek gyűjteményét tartalmazza, azonban ezek deriváltjainak összessége még nem fordul elő a tudományos irodalomban. Előállítottuk számos, szám szerint 70 különböző szerkezeti elemre (lemezek, csövek, hengerek, gömbhéjak, gömbök, köracélok, lyukas szerkezetek) a derivált függvényt és ezekre software is készült, amelyet a későbbiekben kézikönyv formájában szeretnénk megjeleníteni. Mindezekből a következőkben két egyszerű példán keresztül szeretnénk bemutatni az eljárás lényegét, és a software-t.

Néhány egyszerű példa

Tekintsük a 4. ábrán látható hengeres szerkezeti elemünket, melyen egy axiális irányú átható repedés van. A feszültségintenzitási tényező a (1.a), (1.b), (1.c) képletek alapján számítható.

$$K = F \frac{pR}{t} \sqrt{\pi a} \quad (1.a)$$

$$F = 1 + 0.072449 \lambda + 0.64856 \lambda^2 + 0.2327 \lambda^3 + 0.038154 \lambda^4 + 0.0023478 \lambda^5 \quad (1.b)$$

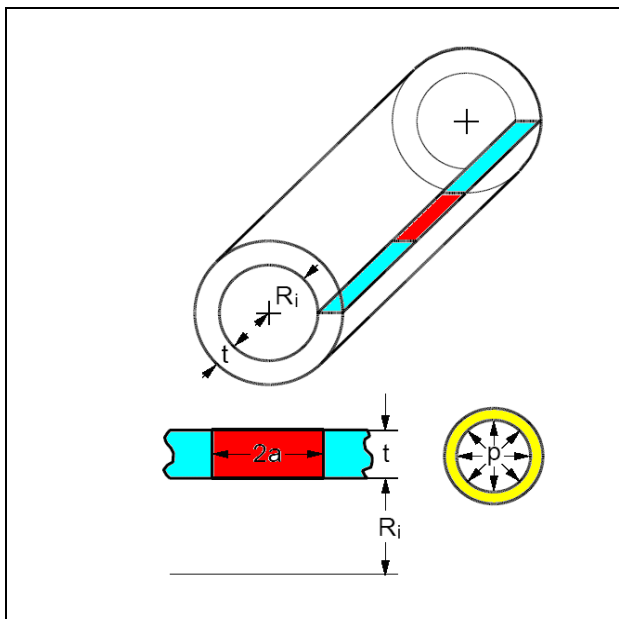
$$\lambda = \frac{a}{\sqrt{Rt}} \quad (1.c)$$

Látható, hogy F függvénye a repedés hosszának, így a derivált függvény a következő alakban (2.a), (2.b) és (2.c) adódik:

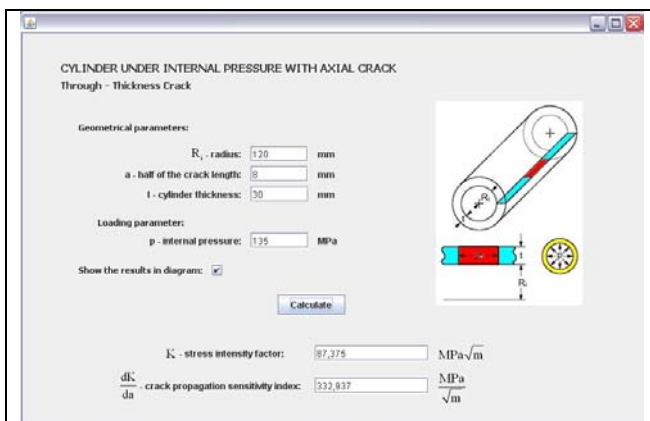
$$\frac{dK}{da} = \frac{dF}{da} \frac{pR}{t} \sqrt{\pi a} + \frac{1}{2} F \frac{pR}{t} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \quad (2.a)$$

$$\frac{dF}{da} = (0.072449 + 1.29712 \lambda + 0.6981 \lambda^2 + 0.152616 \lambda^3 + 0.011739 \lambda^4) \frac{d\lambda}{da} \quad (2.b)$$

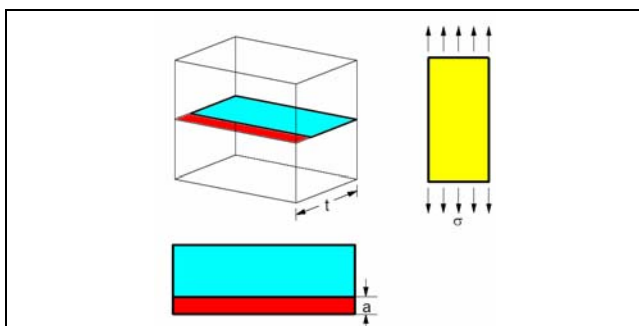
$$\frac{d\lambda}{da} = \frac{1}{\sqrt{Rt}} \quad (2.c)$$



4. ábra: Belső nyomás alatt álló henger, axiális átmenő repedéssel
Fig. 4. Cylinder loaded inner pressure containing axial crack



5. ábra: Repedés terjedési érzékenységének kiszámítás henger esetén Java alkalmazásával (R = 120 mm, t = 30 mm)
Fig. 5. Calculation of crack propagation sensitivity index by the application of Java software



7. ábra: Lemez hosszú felületi repedéssel húzó igénybevétellel terhelve
Fig. 7. Plate containing long crack with tensile load

A henger R=120 mm sugarú és t= 30 mm vastagságú, a repedés hosszának a fele pedig a = 8 mm, melyet egy p = 135 MPa belső nyomás terhel. A 5. ábrán látható az adott példa kiszámítása, míg a 6. ábrán a repedés környezetében kirajzolt feszültségintenzitási tényező ill. a repedés terjedési érzékenység függvénye.

Ugyanazon számításokat alkalmazva húzó igénybevételnek kitett hosszán elnyúló felületi repedéssel bíró lemez esetén, melyet a 7. ábra szemléltet, a következő képletek (3.a), (3.b) és (3.c) alapján számítható a feszültségintenzitási tényező:

$$K = Ya\sqrt{a} \quad (3.a)$$

$$Y = 1.99 - 0.41\left(\frac{a}{t}\right) + 1.87\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 38.48\left(\frac{a}{t}\right)^3 + 35.85\left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad \text{for } \frac{a}{t} \leq 0.6 \quad (3.b)$$

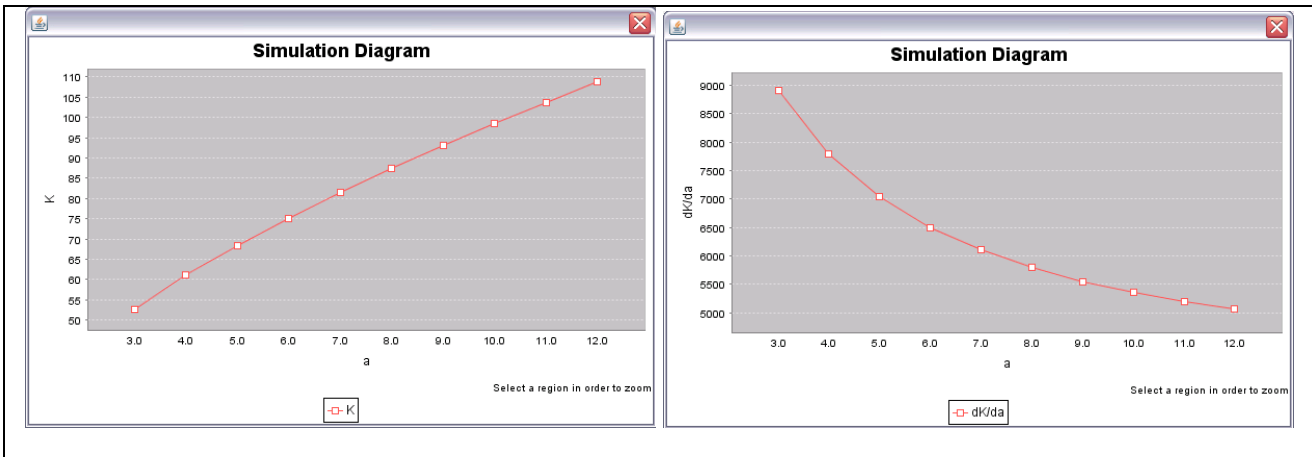
$$Y = \frac{d}{da} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{a}{t}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{a}{t}\right)^{\frac{3}{2}} \left(1 + 3\left(\frac{a}{t}\right)\right) \right] \quad (3.c)$$

for $\frac{a}{t} > 0.6$

$$\frac{dK}{da} = \frac{dY}{da} \sigma \sqrt{a} + \frac{1}{2} Y \sigma \frac{1}{\sqrt{a}} \quad (4.a)$$

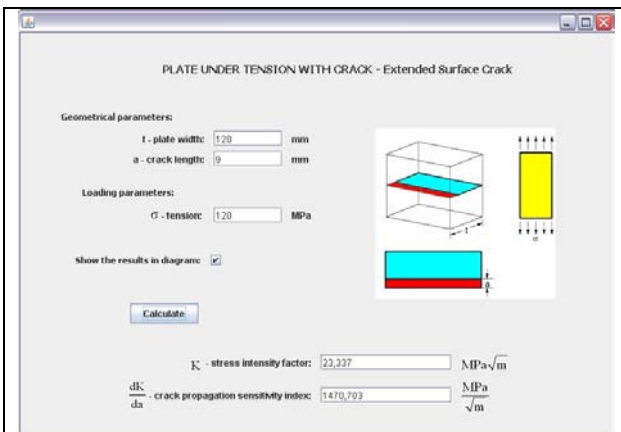
$$\frac{dY}{da} = -0.41 \frac{1}{t} + 37.4 \frac{a}{t^2} - 115.44 \frac{a^2}{t^3} + 215.4 \frac{a^3}{t^4} \quad \text{for } \frac{a}{t} \leq 0.6 \quad (4.b)$$

$$\frac{dY}{da} = \frac{3}{2t\sqrt{\frac{a}{t}\left(1-\frac{a}{t}\right)^{\frac{3}{2}}}} + \frac{3\left(\frac{3a}{t}+1\right)}{4t\sqrt{\frac{a}{t}\left(1-\frac{a}{t}\right)^{\frac{3}{2}}}} - \frac{\frac{3a}{t}+1}{4t\left(\frac{a}{t}\right)^{\frac{3}{2}}\left(1-\frac{a}{t}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad \text{for } \frac{a}{t} > 0.6 \quad (4.c)$$



6. ábra: Feszültségintenzitási tényező és repedés terjedési érzékenységének ábrázolása henger esetén adott példa alapján Java software alkalmazásával (R = 120 mm, t = 30 mm)

Fig. 6. Curves of stress intensity factor and crack propagation sensitivity index by using Java software on an example (R = 120 mm, t = 30 mm)



8 ábra: A feszültségintenzitási tényező és a repedés terjedési érzékenység index számítása software segítségével (t = 180 mm)

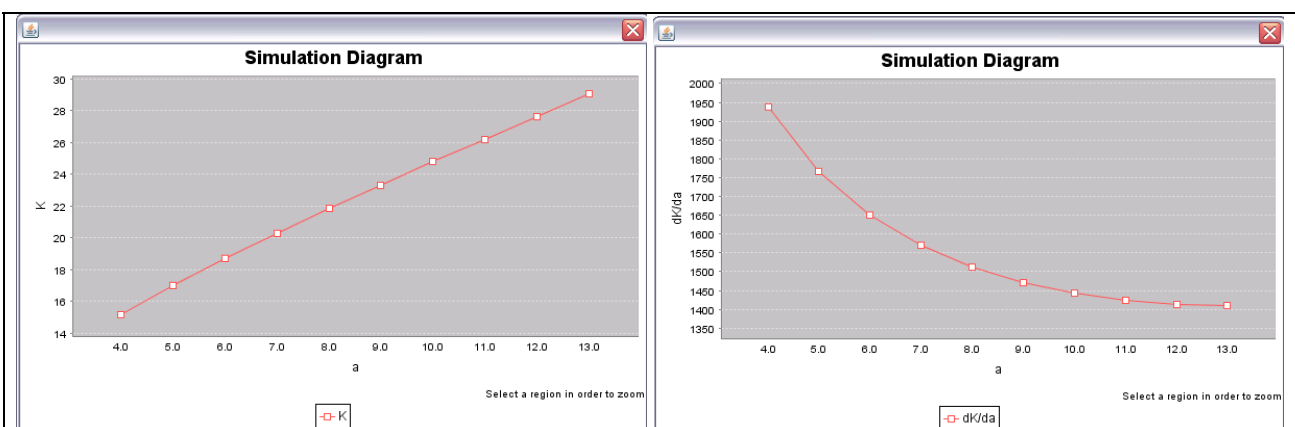
Fig. 9. Calculation of stress intensity factor and crack propagation sensitivity index (t=180 mm)

Ahol az Y függvénye az a repedés hosszának. A derivált függvény a következő formában (4.a), (4.b) és (4.c) adódik:

A t = 180 mm szélességű, a = 14 mm hosszúságú repedéssel bíró, $\sigma = 120$ MPa terhelt lemez feszültségintenzitási tényezőjének és repedés terjedési érzékenység indexének számítása és függvényének ábrázolása a 8. ill. 9. ábrán látható módon történik az általunk programozott software segítségével.

Összefoglalás

A cikkben tett észrevételek és a bemutatott példák kapcsán a következő megállapítások vonhatók le:



9. ábra: A feszültségintenzitási tényező, és a repedésterjedési érzékenység index ábrázolása (t=180 mm)

Fig. 9. Curves of stress intensity factor and crack propagation sensitivity index (t=180 mm)

- A szerkezeti elemek repedés terjedési érzékenység indexének definiálása alapvető fontosságú, mivel a roncsolásmentes vizsgálat, a terhelési állapot, valamint a repedésterjedéssel szembeni ellenállása kapcsolatban van a szerkezetek megbízhatóságának értékelésekor alkalmazott törésmechanikai elvekkel.
- Kvázistatikus terhelésű szerkezeti elemek repedés terjedési érzékenység indexe alkalmas az adott repedés veszélyességének mérlegelésére és a repedések különböző feltételek közötti veszélyességének összehasonlítására.
- Különböző repedésekkel rendelkező más és más szerkezeti elemek dK/da deriváltjának számítása, valamint a számítógépes software-e elkészült.

Hivatkozások

- [1]. Tada H, Paris P.C. and Irwin G.R. The Stress Analysis of Cracks Handbook. Del Research Corp., Hellertown, Pa., U.S.A. 1973.
- [2]. Rooke, D.P., Cartwright D.J. Compendium of Stress Intensity Factors. Her Majesty's Stationery Office, London. 1976.
- [3]. Stress Intensity Factors Handbook. Edited by Y. Murakami, Pergamon Press. 1987. Aliabadi M.H. Database of Stress Intensity Factors. Computational Mechanics Publications.
- [4]. Tóth L. "A computer aided assessment system of reliability cyclic loaded construction elements having flaws". Proc. 1st Int. Conf. on Computer-Aided Assessment and Control of Localized Damage. Portsmouth, UK. 1990 (Edited by M.H. Aliabadi, C.A. Brebbia, D.J. Cartwright), Vol. 1. pp. 39-53, Springer-Verlag.
- [5]. Tóth L. Reliability Assessment of Cracked Structural Elements under Cyclic Loading. in Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures. Edited By A. Carpinteri. Elsevier. 1994. pp. 1643-1683.
- [6]. Carpinteri A. "Surface flaw under cyclic bending loading." Proc. 1st Int. Conf. on Computer-Aided Assessment and Control of Localized Damage. Portsmouth, UK. 1990 (Edited by M.H. Aliabadi, C.A. Brebbia, D.J. Cartwright), Vol. 1. pp. 147-158, Springer-Verlag.
- [7]. Carpinteri A., "Fatigue growth of a surface crack in an elastic plate subjected to cyclic tensile loading". Proc. 8th Cong. Mat. Test. 1982. pp. 327-331, Budapest.
- [8]. Carpinteri A. Crack propagation under cyclic loading. Fat. & Fract. of Eng. Mat. & Struct. 15, 1992. N°4. pp. 265-376.
- [9]. Carpinteri A. "Stress-intensity factors for semi-elliptical surface cracks under tension and bending". Eng Fract. Mech. 38, N°4/5. 1991. pp. 324-334.
- [10]. Carpinteri A. Elliptical-arc surface cracks in round bars. Fat. & Fract. of Eng. Mat. & Struct. 15, N°11. 1992. pp. 1141-1153.
- [11]. Savruk M.P. Stress Intensity Factors of Bodies Having Cracks (in Russian). In Fracture Mechanics and Strength of Materials Vol.2. Edited by V.V. Panasyuk, Naukova Dumka, Kiev. 1988.
- [12]. Pook L.P. Keyword scheme for proposed computer-based bibliography of stress intensity factor solution. NEL Report N°704, Department of Trade and Industry. 1986.
- [13]. Pook L.P. (1989) Unacceptable differences in published stress intensity factor solutions. Fat. Fract. Eng. Mat. Struct. N°1, 67-69.
- [14]. M. Dmytrakh, A.V. Vainaman, M.H. Statschuk, L. Tóth. Reliability and durability of structural elements for heat-and power equipments. (in Ukrainian). Kyiv. 2005.
- [15]. 1st NDE in Relation to Structural Integrity or Nuclear and Pressurized Components. Ed. by M. Bieth, J. Whittle. Woodhead Publishing Limited. 1999.
- [16]. Proc. 2nd NDE in Relation to Structural Integrity or Nuclear and Pressurized Components. New Orleans, USA, 2000.
- [17]. Proc. 4th NDE in Relation to Structural Integrity or Nuclear and Pressurized Components, London, UK, 2005.
- [18]. Gutiérrez-Solana F., Cicero S., Álvarez J. A., Lacalle R. Fitnet Basic Training Package., GKSS Research Centre Geesthacht, Germany, 2001