

Mindennapi törésmechanika – Méret és repedésterjedéssel szembeni ellenállás hatásának elemzése

Dudra Judit^a, Erdei Réka^b, Tóth László^c

^aBay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft, vezető kutató, judit.dudra@bayzoltan.hu

^bBay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft, junior kutató, reka.erdei@bayzoltan.hu

^cnyugalmazott egyetemi tanár, laszlo.toth@bayzoltan.hu

Absztrakt

A mérnöki szerkezetek biztonságos üzemeltethetősége szempontjából a legveszélyesebbek az anyagfolytonossági hibák. Ezeket repedésszerű hibáknak tekintve, hatásuk a törésmechanikai (TM) elvek alkalmazásával értékelhetők. A legkonzervatívabb módszerek, a lineárisan rugalmas törésmechanikai elvek alkalmazása kellő biztonságot nyújtanak a megengedhető repedésméret meghatározására. Mivel a számításoknál minden esetben a $K=\sigma\sqrt{a}$ (geometria) függvényt használjuk, így célszerű azonnal elvégezni az „érzékenységi elemzéseket” is mind a szerkezet geometriai paraméterei, mind pedig az anyagjellemző, a törési szívósság tekintetében. Az így kapott általánosabb kép számos gyakorlati következtetésre ad lehetőséget.

Abstract

The detection of a crack-like defect in any engineering structural element raises one fundamental question: the relative (comparing with the ligament) crack size and (crack) growth resistance (i.e. uncertainty of material property) are functions of the assessment procedure, conclusions. Since only the K value at the crack tip should be used in the calculations, it is strongly recommended to immediately perform a sensitivity analysis of the reliability assessment for both the size effect and the fracture toughness of the materials. This is illustrated by the worked out example.

Kulcsszavak

törésmechanika, biztonság, érzékenység elemzés, mérethatás, törési szívósság hatása

Keywords

fracture mechanics, safety assessment, sensitivity analysis, size effect, effect of fracture toughness

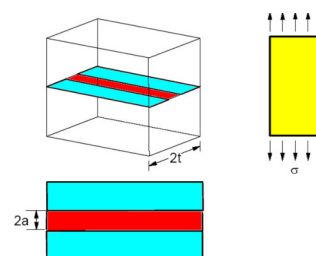
1. Bevezetés

Napjaink általános matematikai szoftverei (Mathcad, MAPLE stb.) már ingyenesen is elérhetők, különösen a „diák”-változatok. Ezek ugyanolyan

segédprogramként használhatók, mint a Microsoft más alprogramjai (Word, Excel stb.). Amennyiben egy mérnöki szerkezetben repedésszerű hibát detektálnak, azonnal számos kérdésre kell választ adni, még hozzá nagyon rövid időn belül. Hogy melyek ezek a kérdések és hogyan érdemes nagyon gyorsan megválaszolni, egy kidolgozott példával illusztráljuk.

2. Húzott lemez belső repedéssel

Tekintsük az 1. ábrán látható, belső repedést tartalmazó kvázistatikus terhelésű húzott lemezt, rudat. A $2t$ vastagságú lemezben a piros színnel jelzett $2a$ hosszúságú átmenő repedést detektálták. A σ húzóterhelés a repedés síkjára merőleges.



1. ábra: Kvázistatikus terhelésű húzott lemez belső repedéssel [1]

A törésmechanikában, annak gyakorlati alkalmazásában nem járatos szakemberek többnyire „pánikba esnek”, hiszen „*a szerkezetben repedésszerű hiba nem engedhető meg!*” Ha valaki mégis „akadémikodik”, akkor a döntéshozó csak annyit mond, hogy „*mutasd azt a szabványt, amelyikre hivatkozni lehet!*” Mivel konkrét esetekre nincs kidolgozott olyan szabvány, amelyet direkt módon alkalmazni lehet, elindul egy olyan döntéshozatali folyamat, amely mindenképpen időt és költségeket igényel. Az alapvető irányok a következők:

- Az észlelt **hibát el kell távolítani** és a szerkezetet javítani kell (általában köszörülés és hegesztéssel történő javítás). Ha a szerkezet hatósági felügyelet alá tartozik, akkor el kell készíteni a megfelelő dokumentációt és engedélyeztetni kell a megfelelő szinten. A detektált repedésszerű hiba ilyen

módon való kezelése általános ipari gyakorlat (sajnos). Időigénye, gazdasági hatása könnyen felmérhető (állásidő meghosszabbodása, újabb tevékenységek beiktatása, munkabéreköltségek emelkedése, stb...), és még ráadásul nem is biztos, hogy a szerkezet biztonsága növekedett (pl. a hegesztéssel előidézett maradó feszültségek növekedése miatt).

- Az észlelt **hiba várható hatását értékelni kell**, majd ennek ismeretében meghozni a szükséges intézkedéseket.

A hiba várható hatásának értékelése [1-4] kapcsán a bevezetésben érintett, rövid idő alatt megválaszolható kérdések a következők:

- Milyen törésmechanikai modellt alkalmazunk?

A válasz egyszerű: a legkonzervatívabbat, azaz azt, amelynél a szerkezetben a terhelés során felhalmozódó rugalmas energia teljes egészében a repedés megnövelésére fordítódik. Ez pedig a lineárisan rugalmas törésmechanika, amelyben a repedéscsúcs környezetében kialakuló viszonyokat a ***K feszültségintenzitási tényező*** jellemzi.

- Hol találom meg az adott esetre vonatkozó képletet a feszültségintenzitási tényező számítására? Válasz: INTERNETEN-en, kézikönyvekben[4-7], felkeresem azt, akinél feltehetően megvan. Jelen esetben használható kifejezés a következő [5]:

$$K = \frac{1 - 0.025 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + 0.06 \left(\frac{a}{t}\right)^4}{\sqrt{\cos\left(\frac{\pi a}{2t}\right)}} \sigma \sqrt{\pi a} . \quad (1)$$

A matematikai szoftvercsomagba ezt az egyetlen képletet kell csupán begépelni, mivel

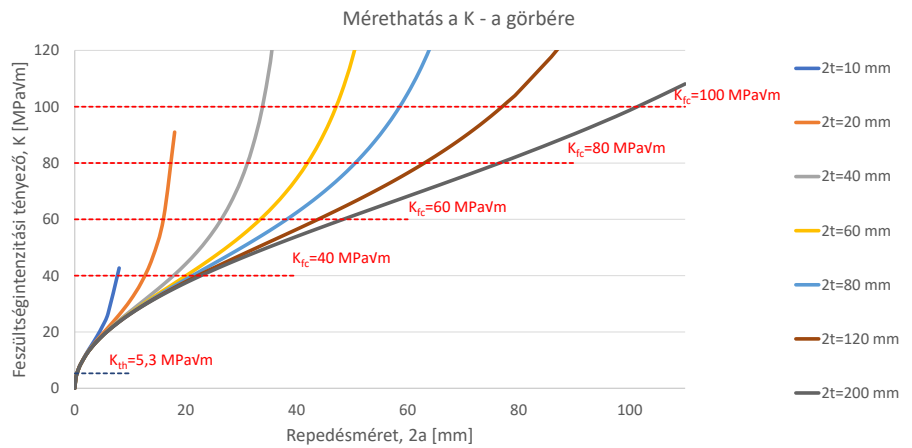
- a t félvastagság (félszélesség) paraméterezhető,
- a σ terheléssel a K értéke lineáris kapcsolatban van.

- Milyen hatással van a lemez vastagsága (szélessége) a kritikus repedéshosszokra?
- Milyen hatással van az anyag repedésterjedéssel szembeni ellenállása, azaz a törési szívóssága a kritikus repedéshosszokra?
- Milyen az együttes hatás, ha a lemez vastagsága és a törési szívósság együttesen változik?

- Milyen nagyságú az a repedéshossz, amely egy 0- σ ismétlődő terhelés mellett növekedésnek indulna, és ez hogyan függne a lemez vastagságától (szélességtől)?

A műszaki és gyakorlati vonatkozású kérdéseket még hosszasan lehetne sorolni, de azt hangsúlyozni kell, hogy újabb képletek begépelésére nincs szükség, azaz minden felsorolt kérdésre választ kaphatunk, méghozzá percek alatt!

A számításokat állandó terhelés ($\sigma=210$ MPa) mellett végeztük különböző lemezszélességekre ($2t=10, 20, 40, 60, 80$ és 100 mm). Ezek alapján a 2. ábrán látható feszültségintenzitás értékeket kaptuk a repedésméret függvényében, ahol a lemez szélességi méretének hatása figyelhe-



2. ábra: A repedés csúcsánál ébredő feszültségintenzitási tényezők értékei a repedés síkjára merőleges $\sigma=210$ MPa terhelésnél

tő meg a feszültségintenzitási tényező értékére. Látható, hogy 2-3 mm-ig a repedések teljesen egymáson futnak, így a minimális terjedőképes repedésméret értékei is azonosak (lásd pl. az 1. ábrát, ahol egy kb. 0,4 mm hosszúságú repedés csúcsában a lemez szélességétől függetlenül azonos, kb. 5,3 MPa√m a feszültségintenzitási tényező értéke) azonban megfigyelhető, hogy a 40 MPa√m-hez tartozó kritikus repedésméret már nagy eltérést mutatnak. Mivel a feszültségintenzitási tényező, a K értéke a terhelő feszültséggel (σ) lineárisan arányos, eltérő feszültség esetén a 2. ábra görbéi a függőleges tengely mentén módosulnak.

A 3. ábrán megrajzolt görbék már figyelembe veszik a törési szívósság, a K_{Ic} hatását is $40 \leq K_{Ic} \leq 100$ MPa√m tartományban.

Amennyiben egy repedésszerű hibát észlelnek az adott szerkezetben, esetleges hatását az a viszony szám érzékelteti meggyőzően, hogy mennyire kell átrepedni ahhoz, hogy a katasztrofális törés

bekövetkezzen, az instabil repedésnövekedés meginduljon. Erre igyekszik rámutatni az 1. táblázat.

Az 1. táblázatban összefoglalt adatok alapján szerkesztett 4. ábrán látható a kritikus repedésméret és lemezszélesség aránya különböző törési szívósság esetén.

Ugyancsak könnyen szerkeszthető (kirajzolható) a kritikus repedésméret és lemezszélesség aránya különböző méretű lemezekre a törési szívósság függvényében (5. ábra).

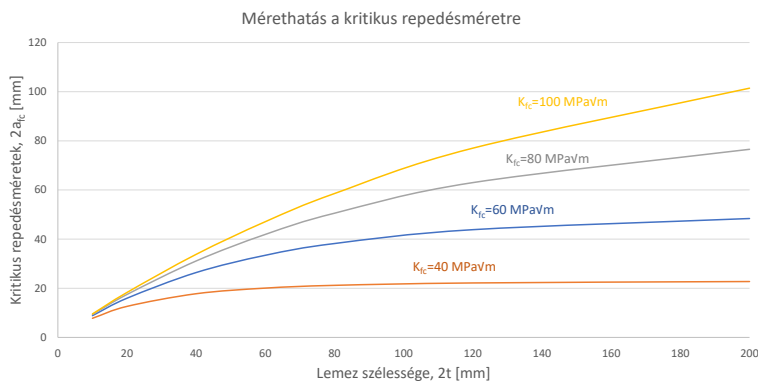
A 2-5. ábrák „iskola-példái” annak, hogy nem több mint 1 órányi munkával, egy egyszerű képlet egyetlen begépelésével és alapvető matematikai programcsomag felhasználásával milyen sok műszaki következtetésre lehet jutni. Az ábrákra csupán rápillantva is azt mondhatjuk, hogy a „detektált” repedésszerű hiba várható hatását először mindenképpen értékelni kell és nem a javítással kell foglalkozni! Akik nem így gondolkodnak, azoknak sajnos számottevő szakmai hiányosságai vannak és jelentős gazdasági károkat okozhatnak.

3. Gyakorlati megállapítások

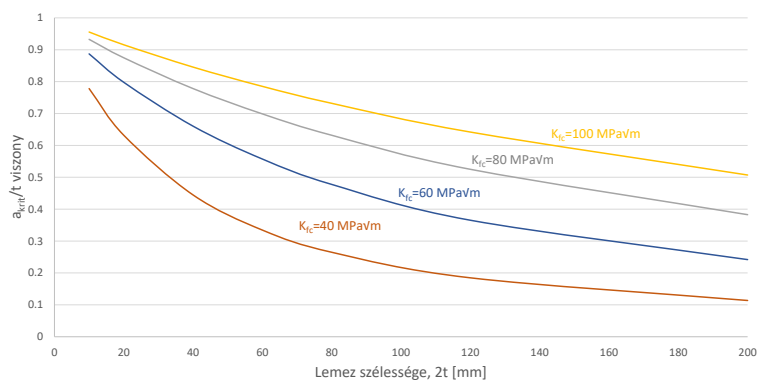
A kidolgozott számpéldák eredményei alapján számos GYAKORLATI következtetésre juthatunk. Ezeket nem kívánjuk részleteiben is bemutatni. Csupán érzékeltetni szeretnénk, hogy egy relatíve kis befektetéssel és minimális szoftverismerettel milyen, a gyakorlatban is jól használható következtetésre lehet jutni egy, az adott szerkezeti elembe detektált repedésszerű hiba várható hatásának értékelése során. A rövid következtetéseket az ábrák sorszáma hivatkozva tesszük meg.

1. táblázat: Az átrepedés aránya a lemezszélessége ($10 \leq 2t \leq 200$ mm) és a törési szívósság ($40 \leq K_{Ic} \leq 100$ MPa \sqrt{m}) függvényében $\sigma = 210$ MPa terhelő feszültség esetén

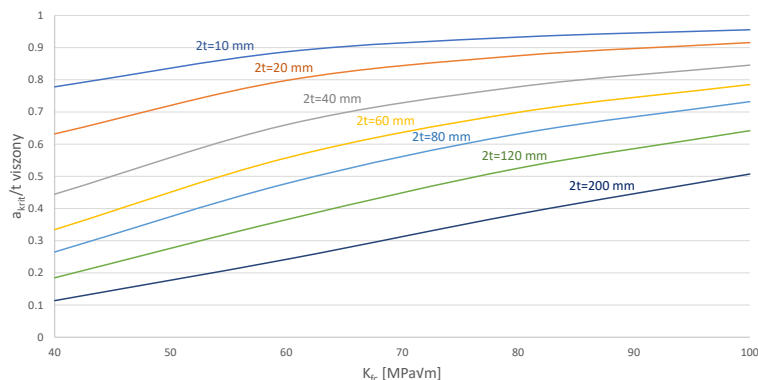
Lemez szélessége	Minimális terjedő-képes repedés	$K_{krit}=40$ MPa \sqrt{m}		$K_{krit}=60$ MPa \sqrt{m}		$K_{krit}=80$ MPa \sqrt{m}		$K_{krit}=100$ MPa \sqrt{m}	
		Töréshez tartozó repedés fele	Arány	Töréshez tartozó repedés fele	Arány	Töréshez tartozó repedés fele	Arány	Töréshez tartozó repedés fele	Arány
2t [mm]	$2a_{th}$ [mm]	$2a_{krit}$ [mm]	a_{krit}/t [%]	$2a_{krit}$ [mm]	a_{krit}/t [%]	$2a_{krit}$ [mm]	a_{krit}/t [%]	$2a_{krit}$ [mm]	a_{krit}/t [%]
10	0,4	7,8	77,8	8,9	88,7	9,3	93,2	9,6	95,6
20	0,4	12,6	63,2	16,0	79,8	17,5	87,5	18,3	91,6
40	0,4	17,8	44,5	26,4	66,0	31,1	77,8	33,8	84,6
60	0,4	20,1	33,4	33,4	55,7	41,9	69,9	47,1	78,5
80	0,4	21,2	26,6	38,2	47,8	50,5	63,2	58,6	73,2
120	0,4	22,2	18,5	43,8	36,5	63,0	52,5	77,0	64,2
200	0,4	22,7	11,4	48,4	24,2	76,6	38,3	101,4	50,7



3. ábra: A kritikus, azonnali törést okozó repedésméret a lemez szélességének függvényében $\sigma = 210$ MPa terhelőfeszültség és a törési szívósság $40 \leq K_{Ic} \leq 100$ MPa \sqrt{m} tartományában



4. ábra: A kritikus repedésméret és lemezszélesség aránya különböző törési szívósság esetén $\sigma = 210$ MPa terhelőfeszültségénél



5. ábra: A kritikus repedésméret és lemezszélesség aránya különböző lemezszélességeknél a törési szívósság függvényében $\sigma = 210$ MPa terhelőfeszültségénél

2. ábra: Az ábrára pillantva a két legfontosabb következtetés az alábbiakban fogalmazható meg:

- Ha a $\sigma=210$ MPa nagyságú terhelés ismétlődő, akkor már egy egészen kicsi méretű repedés ($2a=0,4$ mm) is terjedő képes és biztosan bekövetkezik a törés, függetlenül attól, hogy milyen az elem, a lemez szélessége.
- Minél szélesebb a lemez, annál nagyobb az anyag törési szívósságának a hatása a kritikus repedés-hosszra. E megállapítást egyértelműen alátámasztják a K-a görbék meredekségének csökkenése a lemez szélességének növekedésével.

3. ábra: Ugyancsak egyértelműen alátámasztja a geometriai hatás tartományának függését az anyag törési szívósságától.

1. táblázat: A táblázatban feltüntetett adatok, eredmények alapján levonható következtetések:

- A lemez szélességének növekedésével a kritikus repedéshossz aránya fokozatosan csökken. Ennek mértéke azonban függ az anyag törési szívósságától.
- Kisebb szélességű lemeznél a törés csupán akkor következik be, amikor a repedés megközelíti a lemez szélességét, nagyobb méretű lemeznél pedig akkor, amikor már félig, avagy ennél kisebb mértékben is átreped. Az anyag törési szívósságának hatása pedig jelentős lehet, éppen a K-a görbék 1. ábrán látható meredekségének számottevő változása miatt.

4. és 5. ábrák: Gyakorlatilag megerősítik és szemléletessé teszik a 2-3. ábrák és az 1. táblázat alapján levont, a mindennapi GYAKORLATBAN is felhasználható, döntéseket előkészítő következtetéseket.

A cikksorozatot természetesen folytatni kívánjuk olyan példák bemutatásával, amelyek rámutatnak a törésmechanikai elvek gyakorlati alkalmazásának lehetőségeire és szükségességére. Egy ilyen példa lehet, hogy annak megválaszolása, hogy azonos szerkezeti elemekben, azonos terhelés esetén a felületi vagy a középen levő összeolvadási hiba a veszélyesebb, avagy a biztonságot változtató hatása függ-e az anyag szilárdságától?

4. Összefoglalás

A közlemény célkitűzését és a kidolgozott számpéldák eredményeit tekintve az alábbi megállapítások tehetők:

- Egy adott szerkezeti elembe detektált repedésszerű hiba várható hatása előbb értékelendő, mintsem a hiba javítandó! Aki nem így

- gondolkodik, az nem tekinthető szakembernek!
- Az 1. pontban tett megállapítás azt a bölcs szemléletet tükrözi, hogy „Ha javítani nem tudsz, akkor legalább ne ronts a szerkezet biztonságán”!
- A repedésszerű hiba várható hatásának értékelésére a legkonzervatívabb törésmechanikai elvet, a lineárisan rugalmas modellt használjuk. Ennek alapelve az, hogy a szerkezetben a terhelés hatására felhalmozott rugalmas energia teljes egészében a repedés terjesztésére fordítódik.
- A legegyszerűbb matematikai szoftvercsomagok üzembiztos használata a műszaki gyakorlatban legalább annyira fontos, mint a gépkezelő vezetői engedély a mindennapi életben!
- Mielőtt hozzákezdünk a hiba várható hatásának értékelésére, tegyünk fel magunknak minél több „mi van akkor, ha” kérdést, hiszen ezek mindegyike (döntő hányada) megválaszolható egy jól átgondolt számítási foyamattal.

Irodalomjegyzék

- [1] Dudra J., Erdei R., Tóth L.: Mindennapi törésmechanika a szerkezetek biztonságos üzemelhetőségének alapja. Anyagvizsgálók Lapja, A Magyar Roncsolásmentes Vizsgálói Szövetség Lapja, ISSN: 1215-8410, 2019/IV p.30-41.
- [2] Dudra J., Erdei R., Tóth L.: Mindennapi törésmechanika – Belső nyomással terhelt csővezetékek biztonsága. Anyagvizsgálók Lapja, A Magyar Roncsolásmentes Vizsgálói Szövetség Lapja, ISSN: 1215-8410, 2020/I p.5-10
- [3] L. Tóth., P. Rossmanith: Kísérleti és numerikus feszültséganalízis, A törésmechanika és az anyagvizsgálat története, TEMPUS S_JEP_11271 projekt, Miskolc, 1999 <https://mek.oszk.hu/01100/01191/index.phtml>
- [4] G. Pluvinage, L. Tóth: Kísérleti és numerikus feszültséganalízis, Törésmechanikai példatár, TEMPUS S_JEP_11271 projekt, Miskolc, 1999 <https://mek.oszk.hu/01100/01192/index.phtml>
- [5] Formulae for stress intensity factors and plastic loads IWM VERB 7.0, Fraunhofer IWM, Freiburg., 2003
- [6] Defect assessment software IWM VERB, Version 7.7.0, Fraunhofer IWM, Freiburg. 2002
- [7] I. M. Dmytrakh, L. Tóth, O. L. Bilyy, A. M. Syrotyuk: Workability of materials and structural elements with sharp-tipped stress concentrators, Vol. 13., ISBN 978-966-665-493-2, Lviv, Publishing House (Spolom), 2012