

Mindennapi törésmechanika a szerkezetek biztonságok üzemeltethetőségének alapja

Dr. Dudra Judit¹, Erdei Réka², Tóth László DSc³,

¹ Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft, Vezető Kutató, judit.dudra@bayzoltan.hu

² Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft, Junior Kutató, reka.erdei@bayzoltan.hu

³ Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft, Tudományos tanácsadó,
laszlo.toth@bayzoltan.hu

Összefoglaló: *A mérnöki szerkezetek biztonságos üzemeltethetősége szempontjából a legveszélyesebbek az anyagfolytonossági hibák. Ezeket repedészerű hibáknak tekintve, hatásuk a törésmechanikai (TM) elvek alkalmazásával értékelhetők. A legkonzervatívabb módszerek, a lineárisan rugalmas törésmechanikai elvek alkalmazása kellő biztonságot nyújt a megengedhető repedésméret meghatározására. A biztonság még inkább növelhető az anyagjellemzők konzervatív megválasztásával. A roncsolásmentes vizsgálattal szembeni minimális követelmény az, hogy az így kijelölt repedésméretet üzembiztosan kimutassa.*

Kulcsszavak: *törésmechanika, biztonság, szerkezetintegritás, roncsolásmentes vizsgálat, periodikus felülvizsgálat.*

1. A törésmechanikai elemzések helye, szerepe a periodikus felülvizsgálatokban, a szerkezetek biztonságának megítélésében

1.1 Periodikus felülvizsgálatok jelenlegi rendszere, gyakorlata

A szerkezetek periodikus felülvizsgálata kapcsán különböző roncsolásmentes (általában szemrevételezéses, folyadékbehatolásos, mágneses, esetleg radiológiai, stb.) vizsgálatokat végeznek, ezek eredményeit értékelve döntenek a további üzemeltethetőségről. Nyomástartó rendszereknél (általában az üzemi nyomásnál nagyobb nyomással elvégzett hidraulikus) nyompróbával még meggyőződnek az összeszerelt rendszer biztonságáról. Ha e folyamatot végiggondoljuk csupán egyetlen biztos kapacitást, kritériumot találunk a szerkezet biztonságának megítélésében, nevezetesen azt, hogy sérülés nélkül kibírta-e a próbanyomást, avagy sem. Az összes többi vizsgálati eredmény értékelése többé-kevésbé szubjektív, azaz az üzemeltethetőség és annak feltételei az értékelők felkészültségétől, tudásának

színvonalától, tapasztalataitól, időnként még az érdekkörétől is függhet. A terhelési-, nyomáspróbák tekinthetők egyedül objektívnek (kibírja-e károsodás nélkül, vagy sem!). Nem hagyható azonban figyelmen kívül az a tény, hogy ezek egyrészt költségesek, másrészt káros hatásai is lehetnek, pl. egy 1000 m³-es tartály feltöltése vízzel, ennek a lábazatra, az esetleges lokális képlékeny alakváltozásnak az anyag ridegedésére, átmeneti hőmérsékletére gyakorolt hatása. Ebből egyértelműen következik, hogy terhelés (nyomás) próba önmagában messze nem tekinthető a biztonság megítélésének egyedüli kritériumaként.

1.2 Periodikus felülvizsgálatok javasolt rendszere

A periodikus felülvizsgálatok tervezéséhez más utat kell keresni! A logikailag lehetséges legmegbízhatóbb gondolatsor a következő:

- Feltételezzük, hogy a szerkezetben létezik a biztonságot döntően befolyásoló anyagfolytonossági hiba.
- Ezt a hibát repedésnek tekintjük.
- A repedés csúcsában ébredő viszonyokat konzervatív eszközökkel értékeljük.
- Az anyag repedés terjedésével szembeni ellenállását konzervatív módon becsülve meghatározzuk azt a repedésméretet, amely kritikus állapotot idézhet elő állandó, statikus terhelés esetén.
- E repedés méretét módosítjuk (csökkentjük), abban az esetben, ha a terhelés változó (fáradást okozó) a korábbi üzemeltetési tapasztalatok és a tervezett élettartam függvényében.
- A roncsolásmentes vizsgálatok végzésére pedig olyan módszert, szakembereket választunk, amely garantálja azt, hogy a fenti gondolatmenettel kiszámított repedéshossznál nagyobb hiba 100 % örüli valószínűséggel

kimutatható.

- Zárójelben kell megjegyezni, hogy amennyiben a fenti elemzéssel kijelölt
 - › repedéshossznál nagyobbakat detektálnak, az nem jelenti automatikusan a további üzemeltehetőség kizárását, hanem újabb – kevésbé konzervatív – elemzésre van szükség.
 - › Repedéshosszra a biztonságos detektálás lehetőségét jelentősen csökkentő érték adódik, akkor ugyancsak újabb – kevésbé konzervatív – elemzésre van szükség.

Ahhoz, hogy a javasolt módszer megbízhatóan alkalmazható legyen, mindenképpen biztonsági kritériumokat kell a folyamatba beépíteni. Ezek a következők:

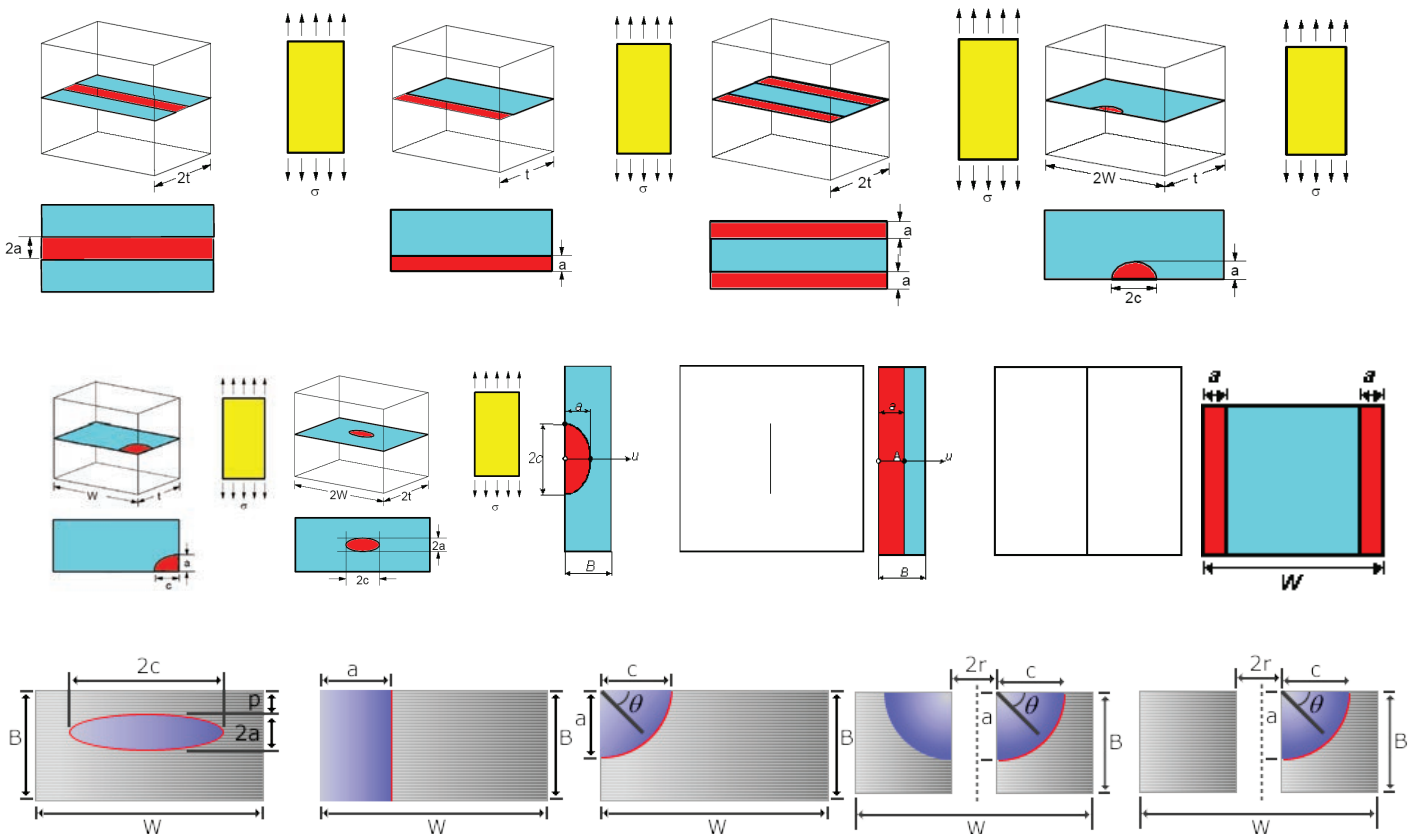
- A repedéscsúcs környezetében kialakuló viszonyok számítására felhasznált összefüggés megbízhatósága
- A repedésterjedéssel szembeni ellenállást tükröző anyagjellemző konzervativizmusának szerepe.

A periodikus felülvizsgálat javasolt rendszerének gyakorlati alkalmazhatóságát egy olyan cikksorozattal mutatjuk be, amelyben az ismertetett lépé-

seket egy-egy tipikus szerkezeti elemre kidolgozott számpéldák szemléltetik.

1.3 A repedéscsúcsban ébredő viszonyokat jellemző paraméterek és ezek gyűjteménye

A lineárisan rugalmas törésmechanika tekinthető a legkonzervatívabb modellnek, mert ezt alkalmazva feltételezzük, hogy a szerkezetet terhelve a benne felhalmozódott alakváltozási energia teljes egészében a repedés terjesztésére fordítódik. A repedéscsúcsban keletkező viszonyok ilyen anyagmodell esetén függenek a szerkezet kialakításától, terhelésének körülményeitől valamint a repedés alakjától, hosszától és helyének paramétereitől. Ekkor a repedéscsúcsban kialakuló viszonyokat az ún. feszültségintenzitási tényező az ún. K ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) foglalja össze. E kifejezések könnyen megtalálhatók kézikönyvekben, különböző közleményekben és az INTERNET-en is [1-3]. Ez utóbbi illusztrálására: a GOOGLE keresésre beírt „SIF expression” több mint 5 millió, a SIF calculator” kb. 1,5 millió, a „SIF formulas” több mint 3,5 millió találatot ad (SIF = stress intensity factor = feszültségintenzitási tényező). Jelenlegi gyűjteményünk 100 különböző esetre tartalmazza a feszültségintenzitási tényező számítására használt kifejezéseket. Ezeket szemlélteti az 1. ábra.





ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA

Az ország vezető szaklapja - www.anyagvizsgaloklapja.hu 2020/I. lapszám

ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA



ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA



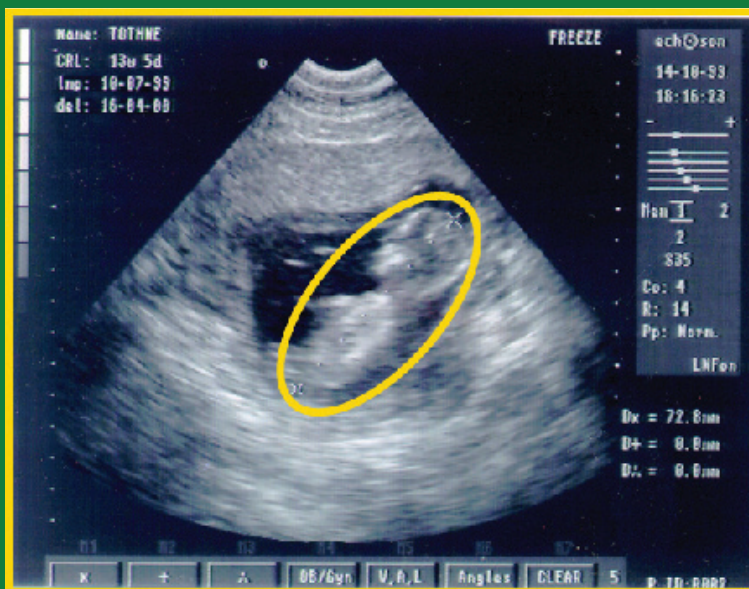
ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA



30

éves az *Anyagvizsgálók lapja*
1990-2020

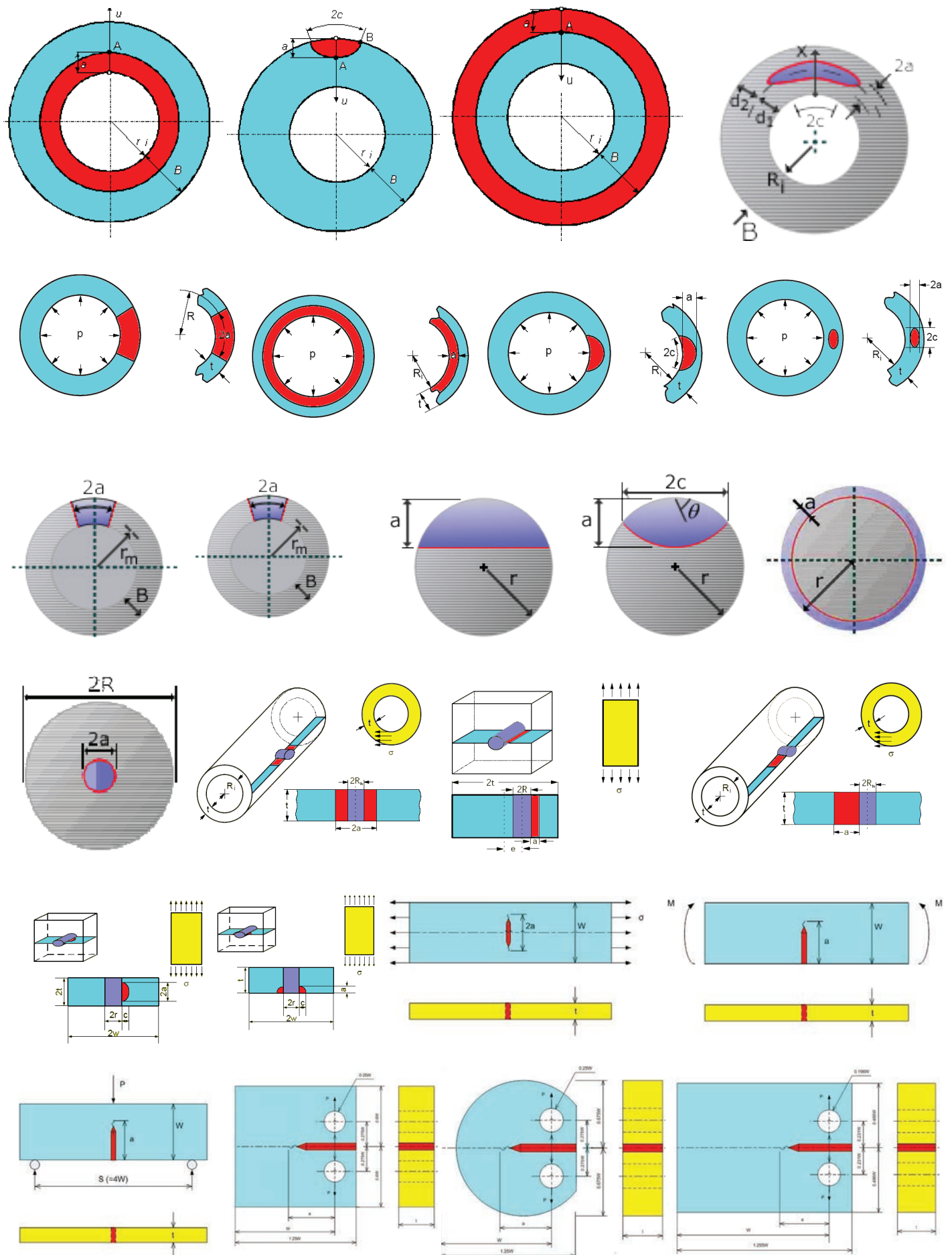
ELŐZETES

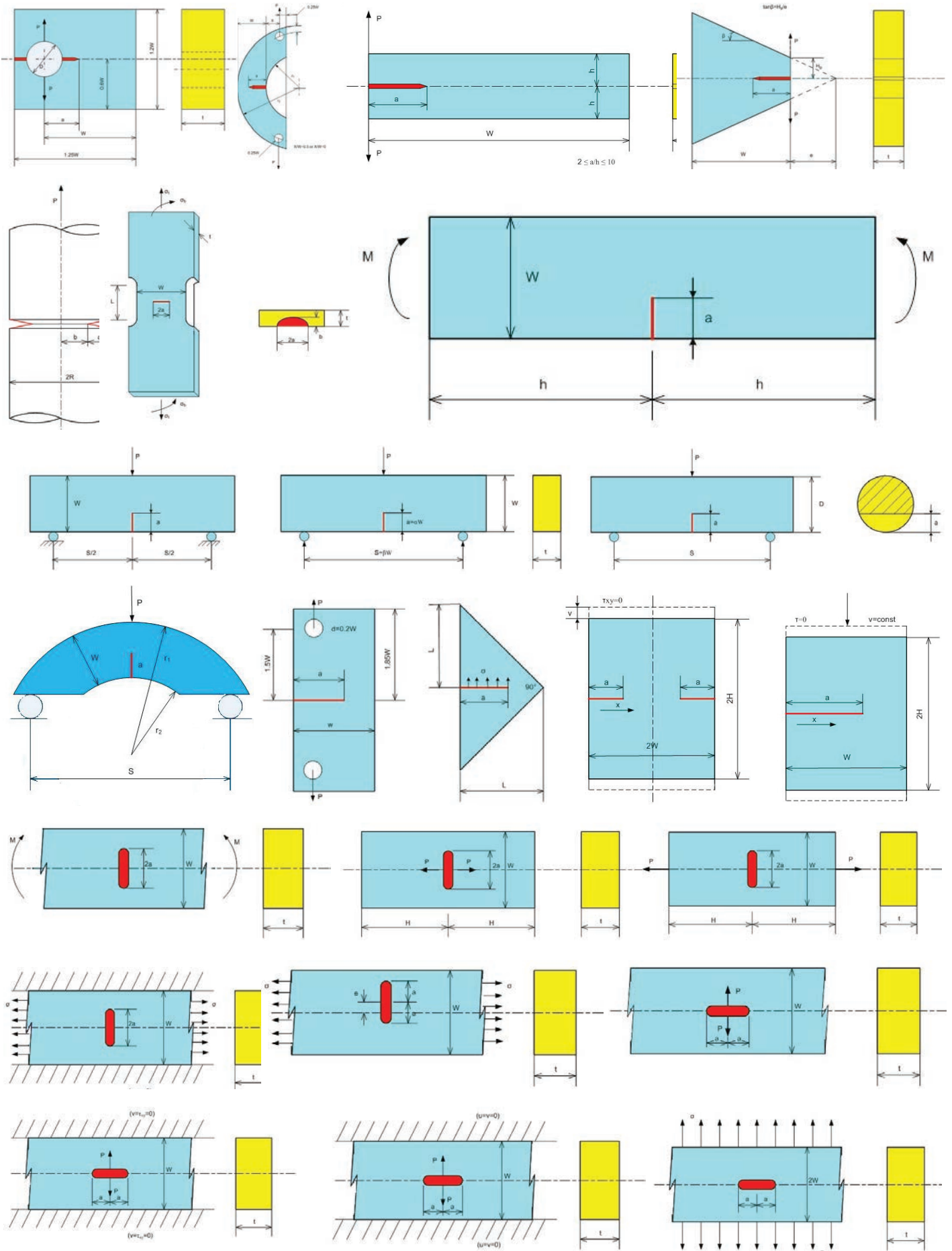


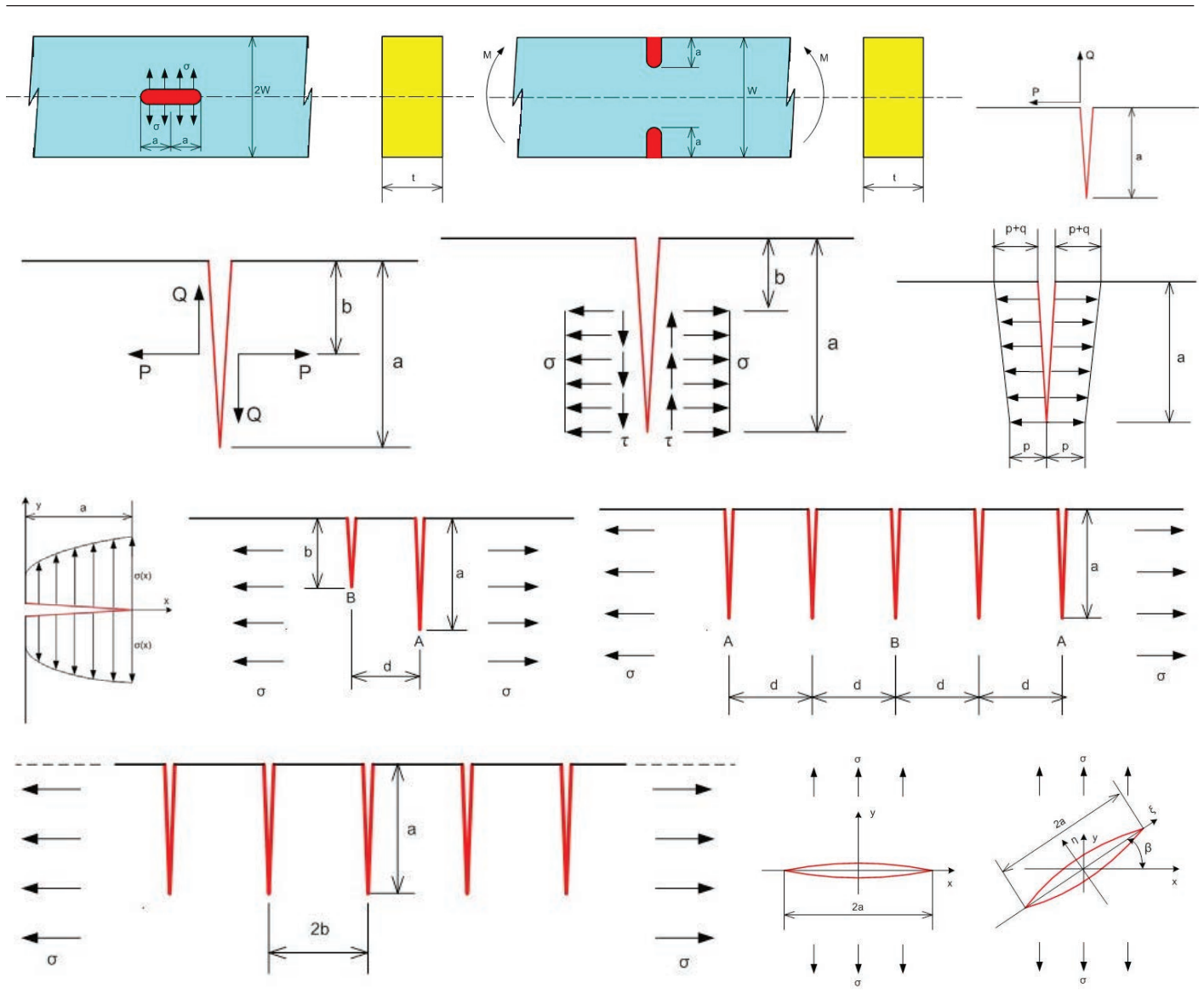
Anyagvizsgálók Lapja 30 éves

Gondoljunk csak bele, hogy ebből a magzatból 30 év alatt milyen kedves NŐ vagy milyen karakán FIÚ alakulhat ki!


Lapunk folyamatos megjelenésével szakmánk változásait igyekeztünk követni.







1. ábra. A feszültségintenzitási tényező számítására összegyűjtött kifejezések különböző szerkezeti elemek és repedéskonfigurációk esetén



Új szakmérnöki képzés: Szerkezetintegritási és roncsolásmentes vizsgáló

A **Debreceni Egyetem Műszaki Kara** új, Szerkezetintegritási és roncsolásmentes vizsgáló szakmérnök szakirányú továbbképzést indít várhatóan 2020-ban. A 180 óra terjedelmű 2 féléves képzés 13 különböző tantárgyaiban **20%-ot** képviselnek a **matematikai** (gépi tanulás, statisztika és véges elemes eljárások), **35%-ot** az **anyagokra** vonatkozó (tulajdonságok változása, hibák értékelése, szerkezetek megbízhatósága) és **45%-ot** a **roncsolásmentes vizsgálati** módszerek, ezek megbízhatósága és az ipar 4.0-ban betöltött szerepük). A képzést sikeresen befejező hallgatók a MAROVISZ második szintű roncsolásmentes anyagvizsgáló tanúsítását is megkaphatják.

A képzés részleteiről Dr. Mankovits Tamás tanszékvezető ad részletesebb tájékoztatást (tamás.mankovits@eng.unideb.hu)

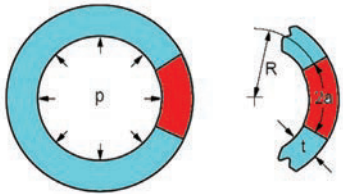
2. Belső nyomással terhelt gömbhéj periodikus felülvizsgálata

A tervezett közleménysorozat első közleményében egy belső nyomással terhelt gömbhéjat veszünk górcső alá. Ebben igazán két veszélyes repedés-konfiguráció tételezhető fel, úgymint **átmenő** (a teljes falvastagságon áthaladó) és a **teljes kerületre kiterjedő** felületi repedés.

2.1 Átmenő repedés gömbhéjon

Az egyik veszélyes repedés-konfiguráció az, amikor a gömbhéjban levő repedésszerű hiba pl. ismétlődő terhelés hatására növekszik, a héj átllyukad, majd a repedés stabilan terjed (a lyuk növekszik). Elérve a kritikus nagyságot a repedés terjedése instabillá válik, azaz a gömbhéj eltörik. E modellt szemlélteti a 2. ábra.

Ilyen a repedés-konfigurációra a szakirodalomban



2. ábra. Átmenő repedés a gömbhéjon

több kifejezés található. A Fraunhofer Intézet VERB7 törésmechanikai programcsomagjában [4]

$$K = M\sigma\sqrt{\pi a} \quad \sigma = \frac{pR}{2t} \quad \delta = 1,818 \frac{a}{\sqrt{Rt}}$$

$$M = 1,006 - 0,00984\delta + 0,3366\delta^2 - 0,0761\delta^3 + 0,006962\delta^4$$

III. egy kézikönyv [5]

$$\sigma = \frac{pR}{2t} \quad \lambda = \frac{a}{\sqrt{Rt}}$$

$$K_I = F\sigma\sqrt{\pi a}$$

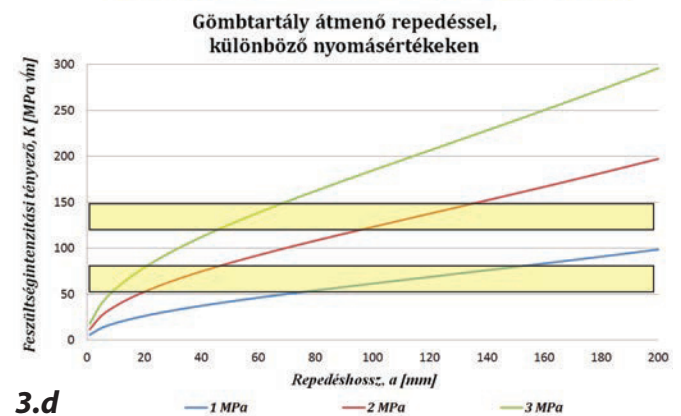
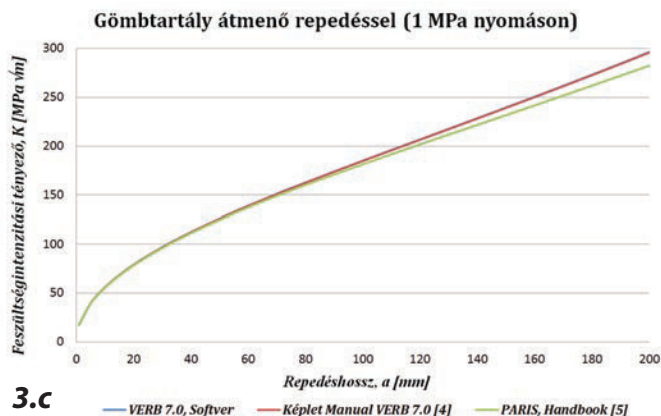
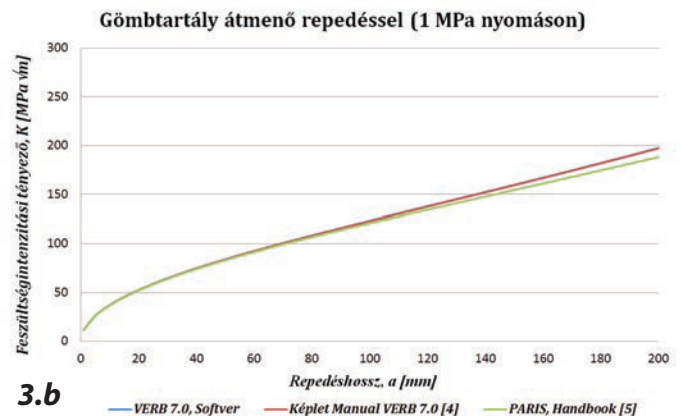
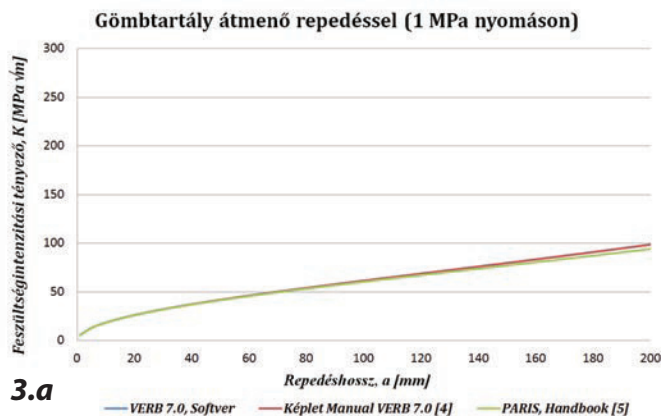
$$F = (1 + 1,41\lambda^2 + 0,04\lambda^3)^{\frac{1}{2}} \quad 0 < \lambda \leq 3$$

képleteket közöl. A VERB 7.0 programjával, a kézikönyvében közölt kifejezéssel, valamint a kézikönyv képleteivel számított feszültségintenzitási tényezőket a 3. ábra szemlélteti a repedéshossz függvényében $0 \leq K \leq 200 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ tartományban a következő geometriai és terhelési adatokkal:

Közepes sugár: $R=6240 \text{ mm}$

Falvastagság: $t=30 \text{ mm}$

Nyomás: $p_1=1 \text{ MPa}$, $p_2=2 \text{ MPa}$, $p_3=3 \text{ MPa}$



3. ábra. A gömbhéj átmenő repedésére különböző összefüggésekkel számított K-értékek a repedéshossz függvényében különböző belső nyomás esetén.

A 3.a.-3.d ábrákon feltüntetett diagramokat szemlélve az alábbi gyakorlati megállapítások tehetők:

- A K_{Ic} -a görbék számítására talált összefüggések azonosnak tekinthetők a $0 \leq K_{Ic} \leq 200 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ tartományban. Megjegyzendő, hogy a tartályok építésénél felhasznált acélok törési szívóssága (K_{Ic} értéke, repedésterjedéssel szembeni ellenállása) nem haladhatja meg a jelzett felső határt.
- A feszültségintenzitási tényező nagysága azonos geometriai paraméterek (átmérő és falvastagság) esetén egyenesen arányos a terheléssel (belső nyomással). Ez egyébként egyértelműen következik a $K - \sigma$ kapcsolatból (lásd a képeteket).
- A 3.d. ábrán különösen jól látható, hogy a törési szívósság (repedésterjedéssel szembeni ellenállás) bizonytalanságának (sárga színnel jelezett sáv) hatása miképpen befolyásolja a repedések kritikus hosszát K_{Ic} és a terhelés (nyomás) függvényében.

A gömbháj anyagának törési szívósságának értékéhez (repedésterjedéssel szembeni ellenállása) különböző módon juthatunk el:

- Szabványos törésmechanikai vizsgálatok elvégzésével a legalacsonyabb megengedhető üzemi hőmérsékleten. Vigyázat! Ilyenkor a legalacsonyabb üzemi hőmérséklethez tartozó terhelést kell figyelembe venni a törésmechanikai elemzéseknél!
- Az anyagcsoportokra vonatkozó K_{Ic} gyűjteményből kiválasztunk egy nagyon is konzervatív értéket. E gyűjteményt szemlélteti a 4. ábra. Látható, hogy a lágycélok 50-90 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ nagyságrendje biztonsággal elfogadható.

A K_{Ic} és más szívóssági mérőszámok (pl. a Charpy próbatesten mért ütőmunka) közötti korrelációs kapcsolatok felhasználásával. Néhány ezek közül:

$$K_{Ic} = \left[\sqrt{0.222 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot (KV)^{3/2}} \right] \cdot 0.0316$$

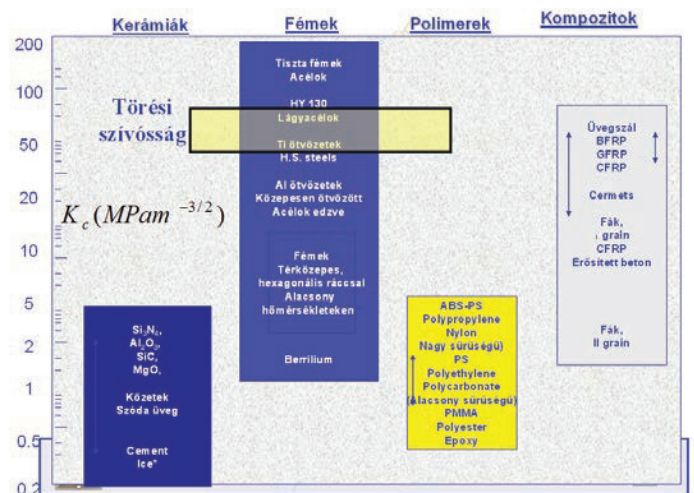
$$K_{Ic} = 14.6 \cdot \sqrt{KV}$$

$$K_{Ic} = 19 \cdot \sqrt{KV}$$

$$K_{Ic} = \left[\sqrt{2.1 \cdot 10^5 \cdot 1.75 \cdot KV} \right] \cdot 0.0316$$

$$K_{Ic} = \sqrt{0.64 \cdot 350 \cdot KV - 6.4 \cdot 10^{-3} \cdot 340^2}$$

$$K_{Ic} = \sqrt{480 \cdot KV - 1.44 \cdot 10^{-3} \cdot 340^2}$$



4. ábra. A különböző anyagcsoportok K_{Ic} értékeinek nagyságrendje

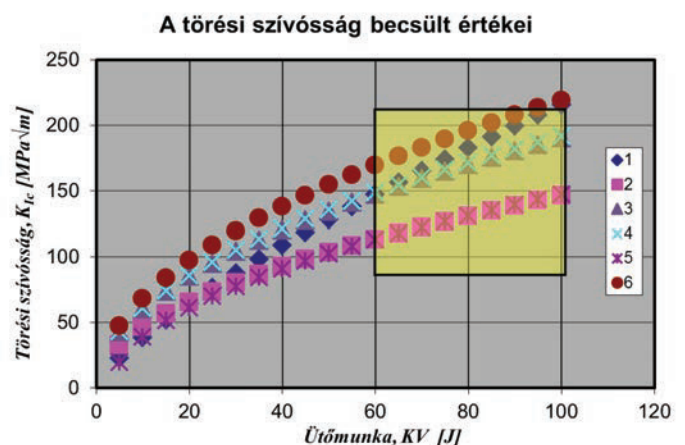
Megjegyzés:

- Folyáshatár: 340 MPa
- Rugalmassági modulus: $2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$

Az előző összefüggésekkel becsült törési szívósságot a Charpy-V próbatesten mért ütőmunka függvényében szemlélteti az 5. ábra.

A kiválasztott gömbháj anyagára vonatkozó ütvehajlító vizsgálatok eredményei alapján került berajzolásra az 5. ábrán a sárga színnel kijelölt négyzet. Ez pedig azt prognosztizálja, hogy az anyag törési szívósságának (K_{Ic}) értéke 100 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ fölött van, azaz a már korábban jelzett 50-90 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ nagyságrend jelentős konzervativizmust tartalmaz.

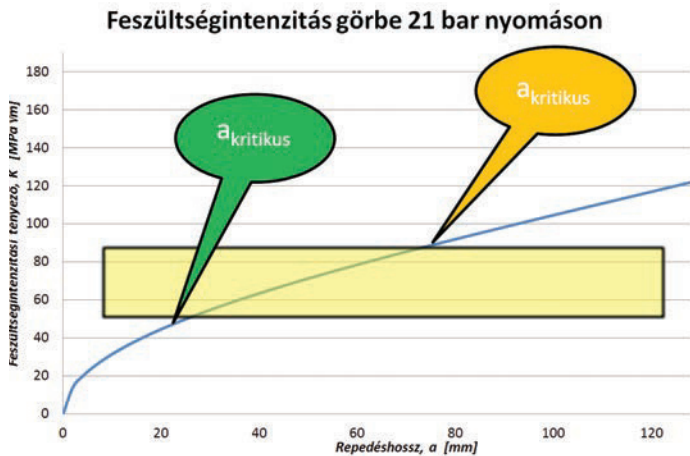
A K_{Ic} -re vonatkozó becslések alapján az adott 2,1 MPa (21 bar) üzemi nyomáson, a falvastagságon



5. ábra. A K_{Ic} becslési értékei a Charpy-V próbatesten mért ütőmunka függvényében

átmenő kritikus repedés hossza (a 6. ábrán láthatóan) 20-50 mm, még a legkonzervatívabb szemléletmód alkalmazása esetén is.

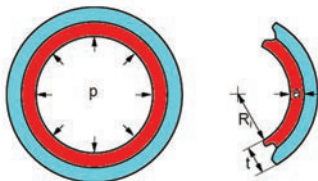
Ebben az esetben tehát teljesül a „lyukadás törés



6. Ábra. A K-a görbe 21 bar nyomáson

előtt” kritérium is (leak before break), amely a nagy ipari katasztrófák megelőzésének egyik eszköze. Az elv kifejlesztésére alapvetően a nukleáris berendezések méretezése, anyagválasztása kapcsán került sor. Alkalmazása kapcsán viszont fel kell készülni az esetleges lyukadás során kiáramló közeg hatásának értékelésére és biztonságos kezelésére.

A kerület mentén körbefutó repedés gömbhéjon Ebben az esetben feltételezzük azt, hogy a gömbháj középíkjában pl. a varrat hőhatásövezetében van egy állandó mélységű körbefutó repedés. Ez a terhelés (pl. változó belső nyomás) hatására fokozatosan mélyül, addig, amíg el nem éri a kritikus mélységet. Ekkor a terjedés instabillá válik, a gömbháj szétesik. E modellt szemlélteti a 7. ábra.



7. ábra. A gömbháj kerülete mentén körbefutó repedés

A repedéscsúcs környezetében a terhelés hatására kialakuló feszültségintenzitási tényező az alábbi összefüggésekkel számítható:

$$K = K_2 + \left[\left(\frac{t}{R} \right) - 0.1 \right] \frac{K_1 - K_2}{0.1}$$

$$K_1 = \sigma \left(1 + \frac{2t}{R} \right) \sqrt{a} \frac{2 - 1.0025 \left(\frac{a}{t} \right) + 4.79463 \left(\frac{a}{t} \right)^2 - 6.21135 \left(\frac{a}{t} \right)^3 + 1.79864 \left(\frac{a}{t} \right)^4}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{t} \right)}}$$

$$K_2 = \sigma \left(1 + \frac{2t}{R} \right) \sqrt{a} \frac{2 - 0.625027 \left(\frac{a}{t} \right) + 3.58965 \left(\frac{a}{t} \right)^2 - 0.968876 \left(\frac{a}{t} \right)^3 - 2.73242 \left(\frac{a}{t} \right)^4}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{t} \right)}}$$

$$\sigma = \frac{pR}{2t}$$

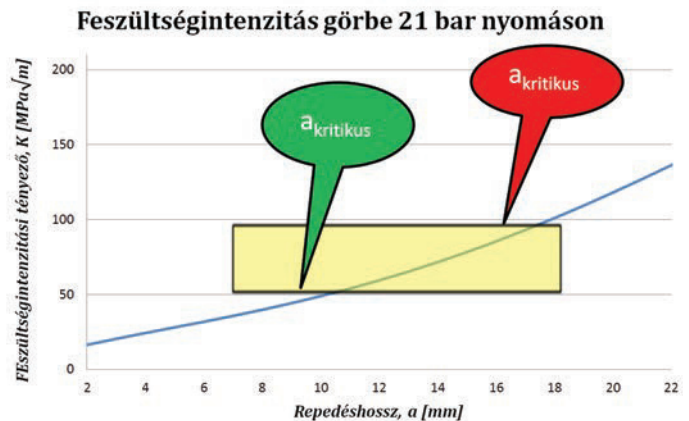
A szakirodalomban más kifejezést nem találtunk ezen esetre.

A belső kerületen körbefutó felületi repedés csúcsá-

ban ébredő feszültségintenzitás tényező értékét a repedés mélységének függvényében a 8. ábra szemlélteti.

Az ábrára pillantva látható, hogy a törési szívósság legkonzervatívabb becslésénél, $K_{Ic} = 50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ értékénél is 8 mm-nél nagyobbra adódik a kritikus repedés mélysége. Kevésbé konzervatív repedésterjedéssel szembeni ellenállás esetén akár elérheti a falvastagság felét is.

Ahhoz, hogy milyen lehessen e kritikus méretűnél rövidebb, és biztonságosan megengedhető repedés hossza, azt kell figyelembe venni, hogy miképpen terjedhet, növekedhet üzemeltetés során és mennyi a tervezett élettartam. Első közelítésben tételezzük fel, hogy a repedés növekedését a változó belső nyomás, a fáradás okozza, és évente van egy maximális és egy minimális terhelés (pl. egy gáztartálynál ez teljesen életszerű, hiszen a mele



8. ábra. A K-a görbe 21 bar nyomáson

gebb évszakokban a töltés, a hidegebbek az ürítés a meghatározó). Természetesen ebben az esetben is a kellően konzervatív törésmechanikai modellek alkalmazásához fordulunk, azaz a lineárisan rugalmas esetet feltételezzük.

A fáradásra végzett törésmechanikai elemzés célja az, hogy ha van a tartályban egy repedés, az hány terhelési ciklus múlva érheti el a kritikus értéket. Ennek megválaszolása azonban több problémát is felvet. Ezeket a következőkben lehet összefoglalni:

- Milyen méretű az a legkisebb repedés, amely terjedhet és a tartály teljes összeomlásához vezet?
- Hogyan lehet e repedést kimutatni, milyen módszerekkel, eszközökkel és kvalifikáltságú szakemberekkel?
- Melyik repedéskonfiguráció a legveszélyesebb?

- Hogyan lehet kompromisszumot találni a roncsolásmentes vizsgálat költségigénye és a tartály megbízhatósága között.

A fenti szempontok együttes mérlegelését nagymértékben segíti az a tény, hogy évenként egy terhelési ciklussal lehet számolni. Ennek **konzervatív jellege azzal is növelhető**, hogy az évi igénybevételt $0 \leq p \leq p_{\max} = 21 \text{ bar}$ tartományban vesszük figyelembe.

A számításokat a következő megfontolásokkal végeztük a különböző repedéskonfigurációk esetén:

- Átmenő repedés**, azaz a tartály már kilyukadt, benne egy **4 mm méretű átmenő repedés** van (a repedéscsúcsban a feszültségintenzitási tényező értéke, $K=24,6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

Feladat: Hány terhelési ciklussal növekedhet a repedés a kritikus 18 mm-es hosszúságúra. Ekkor ugyanis a repedés csúcsában a feszültségintenzitási tényező értéke $K=52 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, amely egyenlő az erősen konzervatív módon becsült törési szívóssággal.

- Belső körkörös repedés, azaz a tartályban már van egy üzembiztosan kimutatható mélységű körkörös repedés. Itt a mélység a lényeges és a kompromisszumkeresésre alkalmas eszköz. Ugyanis, ha kis repedésmélységet, pl. 1-2 mm-t veszünk figyelembe, akkor a vizsgálati költségek emelkednek, de a tartály teljes széteséséhez tartozó ciklusok száma is növekszik.

Feladat: Hány terhelési ciklussal növekedhet a **4 mm mélységű** repedés a kritikus 8 mm-es mélységűre. Ekkor ugyanis a repedés csúcsában a feszültségintenzitási tényező értéke $K=49 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, amely egyenlő az erősen konzervatív módon becsült törési szívóssággal.

Ez utóbbi számítás feltételezi, hogy csupán 4 mm-es repedésmélységet kell üzembiztosan megtalálni, detektálni!

Egy adott a hosszúságú repedést tartalmazó szerkezeti elem maradék élettartama, az N_R értéke a következő összefüggéssel számítható:

$$N_R = \int_a^{a_c} \frac{da}{da/dN} = \int_a^{a_c} \frac{da}{C(\Delta K)^n}$$

ahol:

- a ΔK -az egyszeri nyomásváltozás ($0 \leq p \leq p_{\max} = 21 \text{ bar}$) során a repedés csúcsában a feszültségintenzitási tényező amplitúdója,
- a C és n anyagjellemzők, amelyek között lágya-

céloknál mintegy 400 irodalmi adat alapján **lg C=-3,9872 - 1,4346 n** kapcsolat van. Az n értéke a hegesztett nyomástartó rendszereknél felhasznált acélokra nézve biztosan $2 \leq n \leq 3$ tartományon belül van, így a számítások során az n változásának hatását célszerű elemezni. Különböző méretű átmenő repedés esetén a maradék élettartamot (a kritikus értékig történő növekedés ciklusszámát évi egyetlen terheléssel számolva) az 1. Táblázat foglalja össze. A számításokat az (1) kifejezésben szereplő n kitevő (anyagjellemző) hatásának elemzésére is elvégeztük.

1. Táblázat: A maradék élettartam értékek 4- 16 mm átmenő repedés és $0 \leq p \leq 2,1 \text{ MPa}$ nyomás esetén az anyagjellemzők bizonytalanságának figyelembevételével

a [mm]	N_R (n=2)	N_R (n=2,5)	N_R (n=3)
4	71	62	55
6	52	43	36
8	38	31	25
10	28	22	17
12	19	15	11
14	12	9	7
16	6	4	3

Az 1. Táblázatban feltüntetett maradék élettartamok alapján a következő megállapítások tehetők:

- Ha a gömbhég (tartály) átlukadt és benne egy 4 mm-es átmenő repedés van az igen stabil és még a legrosszabb esetben is 55 terhelési ciklus ($0 \leq p \leq 2,1 \text{ MPa}$) során éri el a kritikus méretet. Ez az évi egy terhelési ciklus esetén 55 éves üzemidőt jelent. Az üzemeltető feladata annak mérlegelése, hogy egy esetleges lyukadásnak mi a következménye (elfagyás vagy a közeg kiáramlása, ill. ez utóbbi esetben a mennyiség és hatásának elemzése).
- Az n anyagjellemző hatása nem számottevő, tehát kísérleti meghatározása pl. a gömbhégből (tartályból) kivágott lemezen több mint felesleges mind gazdasági, mind pedig a gömbhég (tartály) biztonsága szempontjából.

Mivel a mindenkor repedés csúcsában ébredő fe-

szültségintenzitási tényező nagysága a belső nyomástól függ, így természetesen a maradék élettartam is ennek függvénye. Hogy milyen mértékű lehet ez, érzékeltetésül válasszuk a belső nyomás változását $0 \leq p \leq 1,7$ MPa tartományban az előbbi $0 \leq p \leq 2,1$ MPa helyett. A számítások eredményeit a 2. Táblázatban foglaltuk össze.

Az 1. és 2. Táblázat adatainak összehasonlítása alapján jól érzékelhető a terhelés, belső nyomás változásának a maradék élettartamra gyakorolt hatása. Megállapítható, hogy:

- A nyomás értékének csökkentése lényegesen növeli a kritikus repedésméret eléréséhez tartozó élettartamot. Ha még azt is figyelembe vesszük, hogy pl. ha a tényleges belső nyomás még az 1,4 MPa értéknél is kisebb, akkor egy 4 mm hosszúságú átmenő repedés is nagyon stabilan hosszú ideig megtartja méretét.
- Az n anyagjellemző hatása nem számottevő, tehát kísérleti meghatározása a gömbhéjből (tartályból) kivágott lemezen, több mint felesleges mind gazdasági, mind pedig a tartály biztonsága szempontjából.

A belső felületen levő körkörös repedés veszélyesebbnek ítélnélhető, hiszen olyan látható következménye nincs, mint egy teljes átlukadásnak. Ebből adódóan ezt az esetet tekinthetjük mértékadónak a tartály további üzemeltetésére vonatkozó javaslatok megfogalmazásakor. Mint láttuk, kritikus repedésméretre a legkonzervatívabb modellel végzett számítások esetén 8 mm kritikus repedésméret adódott.

2. Táblázat: A maradék élettartam értékek 4-16 mm átmenő repedés és $0 \leq p \leq 1,7$ MPa nyomás esetén az anyagjellemzők bizonytalanságának figyelembevételével

a [mm]	N_R (n=2)	N_R (n=2,5)	N_R (n=3)
4	109	106	104
6	79	73	68
8	59	52	46
10	42	37	32
12	29	25	21
14	18	15	12
16	8	7	6

E méret a 30 mm-es falvastagság figyelemvételével

mintegy ¼ falvastagságot jelent! A maradék élettartam számításának eredményeit foglalja össze a 3. Táblázat, 4 mm-es mélységű (biztosan kimutatható) **Belső felületen levő körkörös kiterjedésű repedés esetén.**

A 3. Táblázatban feltüntetett maradék élettartamok alapján a következő megállapítások tehetők:

- Ha a gömbhéj (tartály) lemezében egy 4 mm-es mélységű körkörös repedés van, az meglehetősen stabil és még a legrosszabb esetben is 14 terhelési ciklus ($0 \leq p \leq 2,1$ MPa) során éri el a kritikus, 8 mm mélységű méretet. Ez az évi egy terhelési ciklus esetén 14 éves üzemidőt jelent. Az n anyagjellemző hatása nem számottevő, tehát kísérleti meghatározása a gömbhéjből (tartályból) kivágott lemezen, több mint felesleges mind gazdaságilag, mind pedig a tartály biztonsága szempontjából.
- A gömbhéj belső nyomásának csökkentése az élettartam növekedését eredményezi. Ennek mértékére végzett számítások eredményeit foglalja össze a 4. Táblázat.

A 4. Táblázatban feltüntetett maradék élettartamok alapján a következő megállapítások tehetők:

- Ha a gömbhéj (tartály) lemezében egy 4 mm-es mélységű körkörös repedés van az meglehetősen stabil és még a legrosszabb esetben is 27 terhelési ciklus ($0 \leq p \leq 1,7$ MPa) során éri el a kritikus, 8 mm mélységű méretet. Ez az évi egy terhelési ciklus esetén 27 éves üzemidőt jelent.
- Amennyiben 5 mm mélységű (biztosan kimutatható) repedésmélységet engedünk meg, még ekkor is 16 terhelési ciklus alatt terjedhet a repedés a kritikus értékre, azaz 8 mm mélységűre. Ez 16 év üzemidőt jelent. Ha a tényleges belső nyomás még ennél is alacsonyabb, így a kritikus repedésméret is nagyobb, ill. ennek következtében a biztonságosan üzemeltethető évek száma is több abban az esetben, ha évente egy terhelési ciklussal kell számolni. Ebből adódóan az éves terhelési adatok folyamatos (évenkénti) feldolgozása indokolt és javasolt.

3. Táblázat: A maradék élettartam értékek 4-7.5 mm mélységű körkörös repedés és $0 \leq p \leq 2,1$ MPa nyomáresetén az anyagjellemzők bizonytalanságának figyelembevételével

a [mm]	N_R (n=2)	N_R (n=2,5)	N_R (n=3)
4	20	17	14
4,5	16	13	11
5	13	10	9
5,5	10	8	6
6	7	6	5
6,5	5	4	3
7	3	3	2
7,5	2	1	1

4. Táblázat: A maradék élettartam értékek 4-7.5 mm mélységű körkörös repedés és $0 \leq p \leq 1,7$ MPa nyomáresetén az anyagjellemzők bizonytalanságának figyelembevételével

a [mm]	N_R (n=2)	N_R (n=2,5)	N_R (n=3)
4	30	28	27
4,5	24	23	21
5	19	18	16
5,5	15	13	12
6	11	10	9
6,5	8	7	6
7	5	4	4
7,5	2	2	2

- Az n anyagjellemző hatása nem számottevő, tehát kísérleti meghatározása a gömbhéjból (tartályból) kivágott lemezen, több mint felesleges mind gazdaságilag, mind pedig a tartály biztonsága szempontjából.

3. Összefoglalás

A közlemény célkitűzését, a számpéldákkal illusztrált, ezek eredményeiből levonható következtetését figyelembe véve az alábbi megállapítások tehetők:

1. A lineárisan rugalmas törésmechanikai elvek, mint a legkonzervatívabb megfontolások, alkalmasak a mérnöki szerkezetek biztonságának értékelésére a periodikus felülvizsgálatok során.
2. A mindennapi alkalmazás eszközszerkezere

(számítástechnikai háttér és a repedéscsúcs környezet viszonyait tükröző feszültségintenzitási tényező – K- számításának összefüggései) biztosított.

3. Mivel a K értékének számítására a szakirodalomban számos összefüggés található, ezeket célszerű összehasonlítani, mert alapvetően hibás következtésre juthatunk.
4. A kritikus hibaméret számítására szolgáló anyagjellemző, a törési szívósság becslésére első közelítésben a legkonzervatívabb eredményeket célszerű figyelembe venni.
5. A kvázistatikus terhelésre vonatkozó kritikus repedés méreténél kisebb nagyságú repedés engedhető meg abban az esetben, ha terhelés ismétlődő. Következésképpen a szerkezet korábbi terheléstörténetének folyamatos feldolgozása indokolt.
6. A kvázistatikus és ismétlődő terhelésre vonatkozó megengedhető repedésméreték különbsége a tervezett élettartamnak (is) függvénye.
7. A megengedhető repedésméreték kimutatására a roncsolásmentes vizsgálatot végzőket tudatosan fel kell készíteni (és ellenőrizni) mind a módszer, eszköz és személyzet tekintetében.
8. Amennyiben a legkonzervatívabb eljárással becsült megengedhető repedéshossz a roncsolásmentes vizsgálat kimutathatóságának határát közelíti, úgy a törésmechanika alkalmazásában kellő gyakorlattal rendelkező szakember a konzervativizmus mértékét tudatosan csökkentheti. Jelen közlemény egy olyan cikksorozat első eleme, amelyekben rá kívánunk mutatni arra, hogy a mérnöki szerkezetek periodikus felülvizsgálata során a biztonság megítélésében a törésmechanikai elvek kiválóan alkalmazhatók, objektumorientált roncsolásmentes vizsgálatok elvégzéséhez tudatos felkészítésre és ellenőrzésre van szükség.

Irodalom

1. Tóth L.: A törésmechanika alapelvei. <https://mek.oszk.hu/01100/01190/>
2. Tóth L., P. Rossmanith: A törésmechanika és az anyagvizsgálat története. <https://mek.oszk.hu/01100/01191/index.phtml>
3. G. Pluvinage, Tóth L.: Törésmechanikai példatár: <https://mek.oszk.hu/01100/01192/index.phtml>
4. Defect assessment software IWM VERB, Version 7.7.0, Fraunhofer IWM, Freiburg. 2002
5. H. Tada, P.C. Paris, G.R. Irwin: Stress Analysis of Cracks Handbook. 3. Kiadás, 2000, ASME Press. 486, old.