

Mindennapi törésmechanika – Belső nyomással terhelt csővezetékek biztonsága

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 Nyugalmazott egyetemi tanár, laszlo.toth@bayzoltan.hu

Összefoglaló:

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 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 alapvető és követendő stratégiája

Ahhoz, hogy bármilyen területen dolgozva a lényegét megértsük, az alapokhoz kell visszalépnünk és azt kell pontosan megérteni. Ha a nyomástartó rendszerekről beszélünk, akkor mi is az alapkérdés? Műszakilag természetesen az, hogy **két térrészt egymástól elhatároljon**. Az egyik a külső környezet, a másik pedig az, amelyben a „**megvalósítandó, tervezett folyamatok**” végbemennek és az emberiség számára hasznot hozó eredmények születnek. Mi is a BIZTONSÁG értékelésének lényegi kérdése? A válasz nagyon sokrétű és sok szálon levezethető. Ha az okokat keressük, akkor a fentiekből direkt módon keressük

- a külső környezet,
- a belső folyamatok és

- a két térrész elkülönítését szolgáló objektumok szerepét a rendszer BIZTONSÁGÁNAK megítélésében. Ha bármilyen rendszer biztonságának értékeléséhez kívánunk hozzákezdeni, az előzőkben említettek mindegyikét át kell tekinteni. Ha ezt nem tesszük, következtetéseink mindig hibákat fog hordozni. Ez lehet kisebb, de katasztrofális is.

Kiragadva a „**két térrész elkülönítését szolgáló objektumok**” **biztonságát**, alapvető követelmény az, hogy az említett két térrészt mindenkor egymástól szétválassza, elzárja a tervezett üzemeltetés végső határidejéig. A további gondolkodás alapja az, hogy ezen alapgondolat miképpen vitelezhető ki és fogalmazható követelményekbe. A gondolatmenetet folytatva jutunk el a mérnöki gondolkodás „alapszavaihoz” és annak tartalmi vonatkozásaihoz. Az alapszavak a következők:

- biztonság,
- megbízhatóság
- kockázat.

Bármit is tervezünk egy adott célra, annak a biztonságos üzemeltethetősége alapkritérium a tervezett periódusban. De a biztonság valószínűségi kategória, dimenziója %!! Annak érdekében, hogy a biztonság szintjére következtetni lehessen műszaki számításokat, méréseket, vizsgálatokat kell végezni, azaz végső soron pénzügyi befektetésre van szükség. Ezzel állítjuk szembe, az üzemeltetés lehetséges kockázatát. Ez pedig nem más, mint egy **valószínűség** és **pénzösszeg** szorzata. A „valószínűség” tükrözi azt, hogy milyen eséllyel NEM TÖLTI BE SZEREPÉT az adott feladatra tervezett objektum (meghibásodás valószínűsége), a „pénzösszeg” pedig a meghibásodás pénzben kifejezett következményeit veszi számba.

A fenti gondolatmenet igaz kell, hogy legyen az üzemeltetés bármelyik periódusában az üzemeltetés kezdetétől a végéig! Ennek „**szűrőpróbaszerű ellenőrzését**” szolgálják a „**periodikus felülvizsgálatok**” Ez különböző roncsolásmentes (általában szemrevételezéses, folyadékbehatolásos, mágneses, esetleg radiológiai, stb.) vizsgálatokat foglal magába, ame-

lyek eredményeit értékelve dönteni lehet a további üzemeltethetőségről. Nyomástartó rendszereknél (általában az üzemi nyomásnál nagyobb nyomással elvégzett hidraulikus) nyomáspróbával még meggyőződnek az összeszerelt rendszer biztonságáról. Ha e folyamatot végiggondoljuk csupán egyetlen biztos kapaszkodót, 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 érdekköreitől 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 hatásaik is lehetnek, pl. 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 [1]

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 a 100 %-ot megközelítő valószínűséggel kimutatható.

- Zárójelben kell megjegyezni, hogy amennyiben a fenti elemzéssel kijelölt
 - › repedéshossznál nagyobbat detektálnak, az nem jelenti automatikusan a további üzemeltethetőség 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 lépéseket egy-egy tipikus szerkezeti elemre kidolgozott számpéldák szemléltetik. Jelen közlemény a belső nyomással terhelt csővezetékek biztonságának megítéléséhez kötődő megfontolásokat veszi számba és kidolgozott számpéldával illusztrálja.

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 un. feszültségintenzitási tényező, a K (MPa \sqrt{m}) foglalja össze. E kifejezések könnyen megtalálhatók kézikönyvekben, különböző közleményekben és az INTERNET-en is [2][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).

2. Belső nyomással terhelt csővezetékek biztonságának megítélése törésmechanika elvek figyelembevételével

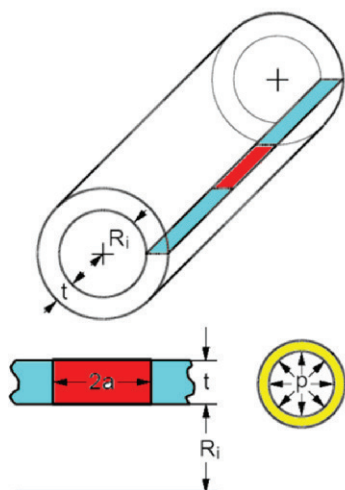
Két legveszélyesebb hiba a **körkörös**-, vagy a **hosszszanti** repedés. Az első pl. adódhat a csövek toldásánál, vagy csőszakaszok hegesztésénél keletkező körkörös gyökhibából, a második pl. a hosszvarratos csövek gyökhibájából.

A repedések csúcsában ébredő K feszültségintenzitási tényező számítására a szakirodalomban számos összefüggés fellelhető [1][5][6][7][8]. Ezek időnként egymással nem kompatibilitás eredményeket szolgáltatnak azonos tartományokban, de az is előfordulhat, hogy a közleményekben elírások vannak, stb. Következésképpen mindig célszerű a talált összefüggések összehasonlítása.

A következő bekezdésekben több összefüggést hasonlítunk össze, valamint a VERB7 program által számolt eredményeket is ismertetjük.

Az összehasonlítás tárgyát képezik:

- Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Non-profit Kft. által alkalmazott összefüggések [1]
- VERB7 program számítási képleteiről megjelent dokumentum [5]
- VERB7 program által kirajzolt görbe [6]
- H. Tada, P.C. Paris, G.R. Irwin „The Stress Analysis of Cracks Handbook” c. kézikönyvben megjelent összefüggések [7]
- I.M.Dmytrakh, L. Tóth, O.L. Bilyy, A.M. Syrotyuk „Workability of materials and structural elements with sharp-tipped stress concentrators” c. könyvébenben megjelent összefüggések [8]



1. ábra. Teljes keresztmetszeten átmenő hosszanti/axiális repedés

Vizsgált esetek:

- teljes keresztmetszeten átmenő hosszanti repedés,
- teljes keresztmetszeten átmenő körkörös repedés.

A számpéldákat a következő alapadatok alkalmazásával készülték:

- Belső sugár: $R_i = 610 \text{ mm}$,
- Falvastagság: $t = 8 \text{ mm}$,
- Nyomás: $p_6 = 6 \text{ MPa}$.

2.1. Teljes keresztmetszeten átmenő hosszanti repedés

A teljes keresztmetszeten átmenő axiális repedés (1. ábra) számításait elvégezve megállapítható, hogy a SIF görbék egymáson futnak, azonban a képletekben fellelhető némi eltérés. Míg az [1][8] irodalmak és a VERB7 összefüggései [5] teljesen megegyeznek és a belső sugárral számolják az összefüggéseket, a PARIS [7] összefüggéseiben a közepes sugár szerepel a λ számításánál. Eltérés tapasztalható az F számításában is, azonban az eltérések ellenére is a görbék jó egyezőséget mutattak (2. ábra).

A számítási összefüggések:

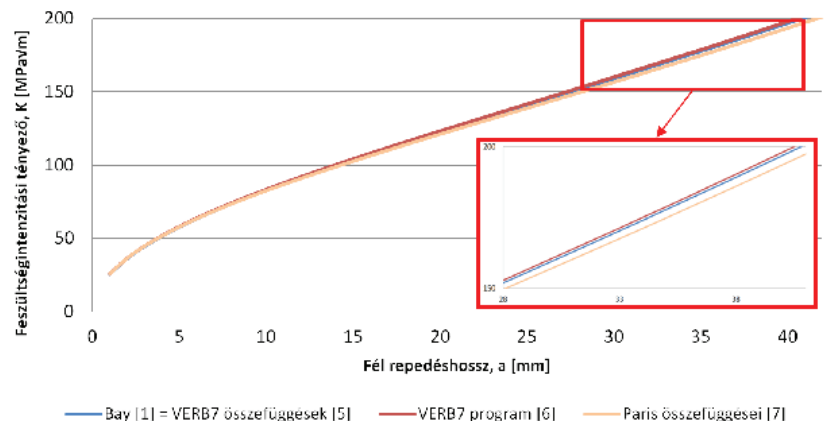
[1][8][5] irodalmak:

$$K = F \frac{pR}{t} \sqrt{\pi a}$$

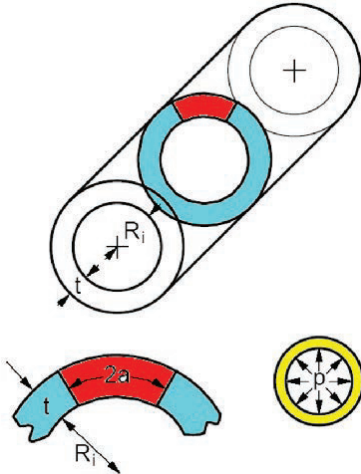
$$F = 1 + 0,072449\lambda + 0,64856\lambda^2 - 0,2327\lambda^3 + 0,038154\lambda^4 - 0,0023478\lambda^5$$

$$\lambda = \frac{a}{\sqrt{Rt}}$$

Feszültségintenzitási tényező axiális irányú átmenő repedés esetén, különböző megoldókkal



2. ábra. Teljes keresztmetszeten átmenő hosszanti repedés különböző megoldókkal



3. ábra. Teljes keresztmetszeten átmenő körkörös repedés

ahol:

- R belső sugár,
- 2a repedéshossz,
- t falvastagság,
- p belső nyomás.

Paris összefüggései [7]:

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

$$F = (1 + 1,25\lambda^2)^{1/2}, \text{ ha } 0 < \lambda \leq 1$$

$$= 0,6 + 0,9\lambda, \text{ ha } 1 < \lambda \leq 5$$

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

$$\lambda = \frac{a}{\sqrt{Rt}}$$

ahol:

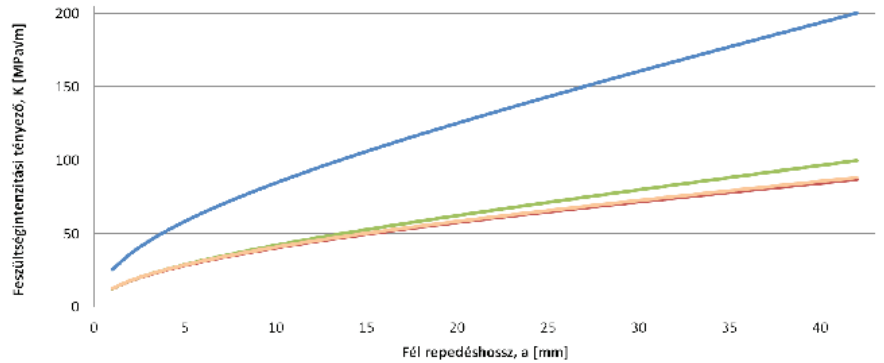
- R közepes sugár,
- 2a repedéshossz,
- t falvastagság,
- p belső nyomás.

2.2. Teljes keresztmetszeten átmenő körkörös repedés

A teljes keresztmetszeten átmenő körkörös repedés (3. ábra) esetén már eltérés tapasztalható a SIF értékei között. Az [1][8] irodalmak összefüggései megegyeznek. A VERB7 program [6] és a PARIS [7] összefüggések alapján számolt görbék szinte egymáson futnak. A VERB7 összefüggései [5] eltérnek attól, amit a program [6] kirajzol. Az eltérés oka itt a feszültség összefüggésében található:

- Az [1][8] irodalmak a közepes átmérővel számolnak ($R_0=R$).
- A VERB7 összefüggéseinél [5] a repedéscsúcs-

Feszültségintenzitási tényező kerületi irányú átmenő repedés esetén, különböző megoldásokkal



— [1] és [8] irodalmak összefüggései — VERB7 program [6] — VERB7 összefüggések [5] — Paris összefüggések [7]

4. ábra. Teljes keresztmetszeten átmenő kerületi irányú repedés különböző megoldásokkal

nál (R_0) lévő feszültséget használja a számításoknál, ami ebben az esetben (átmenő repedés) a külső átmérőre számolt (R_0).

A sugár értelmezésében történő eltérés nagy különbséget mutat (4. ábra) a különböző esetekre, de valószínűsíthető, hogy az utóbbi értelmezés, azaz a külső átmérővel történő számítások a helyesek.

Alkalmazott számítási képletek:

[1][8] irodalmak: (Ezek az összefüggések nagy eltérést mutatnak a többitől, valószínűsíthetően rosszak! Az eltérés az R_0 értelmezésében van.)

~~$$K = F\sigma\sqrt{\pi a},$$

$$\xi = 0,3, R_0 = R_i + \frac{t}{2}, \tau = \frac{\sqrt{\frac{t}{R_0}}}{(12(1 - \xi^2))^{\frac{1}{4}}},$$

$$\alpha = \frac{a}{R}, \delta = \frac{\alpha}{2\tau},$$

$$\beta = 1 + \frac{\pi}{16}\delta^2 - 0,0293\delta^3, \text{ ha } \delta \leq 1$$

$$= \left(\sqrt{8}\frac{\delta}{\pi}\right)^{0,5} + \left(\frac{0,179}{\delta}\right)^{0,885}, \text{ ha } \delta > 1$$

$$\mu = \frac{\sqrt{2}}{\tan\left(\frac{\pi - \alpha}{\sqrt{2}}\right) + \frac{\sqrt{2}}{\tan \alpha}}, \sigma = \frac{P}{\left(\frac{R_0}{R}\right)^2 - 1},$$

$$F_k = 1 + \mu \frac{1 - \frac{\alpha}{\tan \alpha}}{2\alpha}, I_0 = \left(\sqrt{8}(F_k^2 - 1) + \pi \frac{\beta^2}{\delta}\right) \frac{\alpha^2}{\tau},$$

$$F_0 = \left(\frac{I_0}{2\pi\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}.$$~~

VERB7 program összefüggései [5]

$$K = F\sigma\sqrt{\pi a},$$

$$\xi = 0,3,$$

$$R = R_i + \frac{t}{2},$$

$$\alpha = \frac{a}{R},$$

$$\delta = \frac{\alpha}{2\tau},$$

$$\beta = 1 + \frac{\pi}{16}\delta^2 - 0,0293\delta^3, \text{ ha } \delta \leq 1$$

$$= \left(\sqrt{8}\frac{\delta}{\pi}\right)^{0,5} + \left(\frac{0,179}{\delta}\right)^{0,885}, \text{ ha } \delta > 1$$

$$\mu = \frac{\sqrt{2}}{1 + \tan\left(\frac{\pi - \alpha}{\sqrt{2}}\right) + \frac{\sqrt{2}}{\tan\alpha}},$$

$$R_a = R_i + t - a \text{ (a repedés csúcsánál, itt: } R_a = R_i + t),$$

$$\sigma = \frac{p}{\left(\frac{R_a}{R_i}\right)^2 - 1},$$

$$F_k = 1 + \mu \frac{1 - \frac{\alpha}{\tan\alpha}}{2\alpha},$$

$$I_o = \left(\sqrt{8}(F_k^2 - 1) + \pi\frac{\beta^2}{\delta}\right)\frac{\alpha^2}{\tau},$$

$$F_0 = \left(\frac{I_o}{2\pi\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Paris összefüggései [7]:

$$K = F\sigma\sqrt{\pi a},$$

$$F = (1 + 0,3225\lambda^2)^{1/2}, \text{ ha } 0 < \lambda \leq 1$$

$$= 0,9 + 0,25\lambda, \text{ ha } 1 < \lambda \leq 5$$

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

$$\lambda = \frac{a}{\sqrt{Rt}}.$$

3. Gyakorlati megállapítások

Az előzőekben bemutatott példák – egyébként az ipari gyakorlatban is előforduló geometriai, terhelés és anyagi paraméterekkel elvégzett számítások eredményei – számos következtetést támasztanak alá.

Vegyük ezeket sorra először az átmenő hosszanti repedés tekintetében.

- Ha a cső átllyukad, a repedés nem terjed instabilan tova még akkor sem, ha a cső anyaga rendkívül rideg is (pl. $K_{Ic} \leq 50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$). Megjegyzendő, hogy a tranzitvezetékek építésénél használt anyagok törési szívóssága az üzemeltetés körülményei között 150-200 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ nagyságrendbe esnek.
- Az előbbi megállapításból viszont következik az is, hogy átllyukadás esetén a kiáramló közeg esetleges hatását célszerű mérlegelni egyrészt a „mire jó” (pl. hiba detektálása), vagy a „mit okoz” kérdések feltevésével (pl. robbanásveszély előidézése, környezeti kár a következmény, mérgező hatás, stb.).
- A K-a görbét szemlélve az is látható, hogy a kritikus hibaméretre jelentős hatást gyakorol az anyag törési szívóssága. Ebből adódóan ezt célszerű kellő körültekintéssel, megbízhatósággal kísérleti úton meghatározni, hiszen nem mindig, hogy megelégszünk egy becsült alsó határral (pl. $K_{Ic} \leq 50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ érték esetén a kritikus repedéshossz kb. 4 mm, míg $K_{Ic} \leq 100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ -nél 15 mm, avagy $K_{Ic} \leq 150 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ mintegy 30 mm). Gondoljunk csak a b. pontban említettekre!
- Mivel a 2. ábra 6 MPa belső nyomásra vonatkozó viszonyokat tükrözi, nagyon egyszerűen következtethetünk a nyomásviszonyok változtatásának hatására. Semmi mást nem kell figyelembe venni, mint azt, hogy a függőleges tengely mentén a K érték a belső nyomással lineáris összefüggésben van.

Nézzük milyen gyakorlati következtetés lehetőségét kínálja a **4. ábra, kerületi repedés esetére!**

- Eklatánsan látható, hogy a „kék színnel rajzolt görbe” nem illik a többi közzé, tehát az összefüggés hibás!!! Már ez - az egyetlen - példa is nyomatékosan aláhúzza azt az igényt, hogy amikor számolunk és eredményeiből gyakorlati következtetések kívánunk levonni, óvatosnak, körültekintőknek kell lennünk!!
- Ha cső átllyukad, a repedés nem terjed instabilan tova még akkor sem, ha a cső anyaga rendkívül rideg is (pl. $K_{Ic} \leq 50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)!
- Az előbbi megállapításból viszont következik

az is, hogy átlukadás esetén a kiáramló közeg esetleges hatását célszerű mérlegelni egyrészt a „mire jó” (pl. hiba detektálása), vagy a „mit okoz” kérdések feltevésével (pl. robbanásveszély előidézése, környezeti kár a következmény, mérgező hatás, stb.).

- d. E példa kapcsán is különös hangsúlyt kap a csőanyag törési szívósságának szerepe a kritikus repedésméret tekintetében, hiszen ha csupán $K_{Ic} \leq 50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, akkor a kritikus félrepedéshossz 12-13 mm, ha pedig $K_{Ic} \leq 100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, akkor 12 mm helyett 40 mm!
- e. Az előzőkből „kiabáló módon” (szinte „süvíve”) tör elő a helyszíni körvarratok megkövetelendő minősége!! A varratoknak tömörnek kell lenni (ez nem kérdéses), de az, hogy milyen zárványokat és milyen eloszlásban, vagy milyen egyéb hibákat engedünk meg, mindenképpen elgondolkodtató. Ugyanezen probléma más megfogalmazásban: egy körvarrat javítása/nem javítása műszaki szempontból mindenképpen elgondolkodtató. Még inkább igaz ez, ha a gazdasági hatásokat, következményeket is mérlegeljük (köszörülés, hegesztők vezénylése, be rendezések, javított varratok újbóli ellenőrzése, stb.).

Hangsúlyozni kívánjuk, célunk csupán az volt az egyes konkrét következtetések megfogalmazásával, hogy rámutassunk egy-egy számpélda kapcsán a gyakorlatban használható, hasznosítható, de egyben jelentős gazdasági-műszaki következményeket hordozó gondolatok lehetőségére.

4. 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 eszközszerkezete (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 következtetésre juthatunk.
4. A kritikus hibaméret számítására szolgáló anyagjellemző, a törési szívósság becslésére első közelítésben a legkonzervatívabb eredményeket cél-

szerű figyelembe venni.

5. A megengedhető repedésméret kimutatására a roncsolásmentes vizsgálatot végzőket tudatosan fel kell készíteni (és ellenőrizni) mind a módszer, eszköz és személyzet tekintetében.
6. 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 második 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] Dr. Dudra J., Erdei R., Tóth L.: Mindennapi törésmechanika a szerkezetek biztonságos üzemeltetésének alapja. Anyagvizsgálók Lapja, A Magyar Roncsolásmentes Vizsgálati Szövetség Lapja, ISSN: 1215-8410, 2019/IV p.30-41.
- [2] Tóth L.: Kísérleti és numerikus feszültséganalízis, A törésmechanika alapelvei (Paul C. Paris VIDEO-sorozat kézikönyve), TEMPUS S_JEP_11271 projekt, Miskolc, 1999 <https://mek.oszk.hu/01100/01190/>
- [3] Tóth L., 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, Tóth L.: 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] H. Tada, P.C. Paris, G.R. Irwin: The Stress Analysis of Cracks Handbook. 3. Kiadás, ISBN 0-7918-0153-5, ASME Press. New York, 2000, p.478, 485.
- [8] 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