

KÍSÉRLETI ÉS NUMERIKUS FESZÜLTSEGANALIZIS

AZ R6 MÓDSZER ÉS GYAKORLATI ALKALMAZÁSA

LENKEYNÉ BIRÓ GYÖNYVÉR
Miskolci Egyetem, Bay Zoltán Intézet

J. G. BLAUDEL, L. HODULAK
Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg

S. REALE
Universita Degli Studi di Firenze, Firenze

Készült: a TEMPUS S_JEP_11271 projekt támogatásával

Miskolc Freiburg - Firenze
- 1999 -

KÍSÉRLETI ÉS NUMERIKUS FESZÜLTSGANALÍZIS

AZ R6 MÓDSZER ÉS GYAKORLATI ALKALMAZÁSA

LENKEYNÉ BIRÓ GYÖNGYVÉR,
Miskolci Egyetem

J. G. BLAUDEL, L. HODULAK,
Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg (Németország)

S. REALE,
Universita Degli Studi di Firenze, Firenze (Olaszország)

Készült: a TEMPUS S_JEP_11271 projekt támogatásával

Miskolc – Freiburg - Firenze
- 1999 -

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 vezetéseket, 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 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 feltételi.

A szerkezetintegritás tehát egy igen komplex terület. Akik ezt művelik azoknak képesnek kell lenniük arra, hogy az üzemeltethetőséggel 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 alapelve 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:

- S. Crutzen, Joint Research Centre, Petten
- Prof. G. Pluvinage, Universitz of Metz
- Prof. H. P. Rossmanith, Bécsi Műszaki Egyetem
- Prof. T. Varga, Bécsi Műszaki Egyetem, ill. e füzet társszerzői
- Dr. J. G. Blauel és Dr. L. Hodulak, Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik és
- Prof. S. Reale, Università Degli Studi di Firenze.

Miskolc, 1998. június 15.

Tóth László

egyetemi tanár

a projekt koordinátora

Jelen füzet egyike annak a sorozatnak, amelyik a numerikus és kísérleti feszültséganalízissel foglalkozik.

A szerkezetek, berendezések biztonságos üzemeltetéséhez többek között az is szükséges, hogy a bennük lévő (gyártás során vagy üzemelés közben keletkezett) repedések vagy repedésszerű hibák veszélyességét meg kell tudnunk ítélni. Ehhez a különböző hibaértékelő, törésmechanikai elveken alapuló módszerek közül egyre elterjedtebben alkalmazzák az ún. kétparaméteres módszereket. Ilyenkor nemcsak egyszerűen a szerkezet terheléséből meghatározható valamilyen törésmechanikai paramétert (K_I , J_I , COD) hasonlítják össze a megfelelő anyagjellemzővel, hanem figyelembe veszik, hogy a szerkezeti elemek törése általában két határeset: a ridegtörés és a képlékeny összeomlás között történik. A kétparaméteres hibaértékelő módszerek közül az R6 néven ismert a legelterjedtebben alkalmazott. Jelen füzet ennek a módszernek az elvi alapjaival és részletes bemutatásával foglalkozik, illetve néhány kidolgozott mintapéldán keresztül bemutatja gyakorlati alkalmazási lehetőségeit.

Mint minden új kezdeményezésnek, e füzetnek is nyilvánvalóan meglesznek a maga hiányosságai és a jövőben számos területen kiegészítésre szorulnak. Ezt nagyban segítené az, ha a Tisztelt Olvasók észrevételeiket, javaslataikat a szerzőknek vagy a projekt vezetőjének eljuttatnák. A TEMPUS program nyújtotta támogatás lehető legjobb kihasználása érdekében az elkészült tananyagokat INTERNET-en is közreadjuk (<http://www.bzlogi.hu/tempus.html>) annak érdekében, hogy a szerkezetintegritás diszciplínája hazánkban minél gyorsabban és minél szélesebb körben elfogadásra és elterjedésre találjon.

Miskolc, 1999. Május 31.

Lenkeyné Biró Gyöngyvér¹

J. G. Blauel²

L. Hodulak²

S. Reale³

¹ Honlap: <http://www.bzlogi.hu/> vagy <http://www.uni-miskolc.hu/>

² Honlap: <http://www.iwm.fhg.de>

³ Honlap: <http://www.dmti.unifi.it/>

TARTALOMJEGYZÉK

| | |
|--|-----------|
| 1. BEVEZETÉS..... | 6 |
| 2. AZ R6 MÓDSZER ELVI ALAPJAI | 7 |
| 3. HATÁRGÖRBÉK | 12 |
| 4. IRODALOMJEGYZÉK | 16 |
| 5. MINTAPÉLDÁK..... | 17 |
| 5.1. EGYIRÁNYBAN VÉGTELEN HOSSZÚ LEMEZ, KÖZÉPEN ELHEL YEZKEDŐ ELLIPTIKUS REPEDÉSSSEL – EGYTENGELYŰ HÚZÁS (IWM VERB PROGRAMMAL) | 17 |
| 5.2. HENGERES ALUMÍNÍUM TARTÁLY KÖRVARRATTAL – AXIÁLIS REPEDÉSSSEL (IWM VERB PROGRAMMAL) | 23 |
| 5.3. BELSŐ NYOMÁSSAL TERHELT EGYENES CSŐSZAKASZ - KÜLSŐ FELÜLETEN AXIÁLIS ELLIPTIKUS REPEDÉSSSEL (NUCLEAR ELECTRIC R6 PROGRAMMAL) | 30 |
| 1. SZ. MELLÉKLET: ELŐADÁS A SZERKEZETEK BEN LÉVŐ HIBÁK VESZÉLYESSÉGÉNEK ÉRTÉKELÉSÉRŐL | 40 |

1. Bevezetés

Az üzemelő mérnöki szerkezetekben (csővezetékek, kazánok, tárolótartályok, hidak, stb.) előfordulhatnak különböző hibák. Ezek a hibák már gyártás közben megjelenhetnek (pl. zárványok, hegesztési repedések, stb.) vagy üzemelés közben keletkezhetnek (pl. fáradás, környezeti hatás következtében, stb.). Ma már elfogadott tény, hogy a repedéssel vagy repedésszerű hibával rendelkező szerkezetek biztonságosan üzemeltethetők a korszerű törésmechanikai elvek alkalmazásával.

A jelenlévő hibáknak csak egy kis hányada fenyegetheti a szerkezetek integritását, és az esetleges balesetek elkerülése érdekében meg kell találni ezeket a veszélyes hibákat. Ez egyrészt azt jelenti, hogy korszerű roncsolás-mentes módszerekkel megállapítandó a hibák helye és mérete, másrészt meg kell tudni ítélni a megtalált hibák veszélyességét. Az üzemelő szerkezetekben lévő hibák értékelésénél alkalmazható elvek, módszerek bemutatása meghaladja ezen füzet kereteit. De a hibaértékelés összetettségét, a módszerek rövid összefoglalását bemutatandó az *1. sz. mellékletben* megtalálhatók egy szakmai szemináriumon elhangzott előadás főliái erről a témáról.

A repedésszerű hibák értékelésére sok területen ma már elfogadott, szabványosított módszereket alkalmaznak. Számos iparág dolgozott ki olyan szabványokat, amelyek az üzemeltetés biztonságára vonatkoznak (fitness-for-service: üzemelési alkalmasság). Például a nukleáris energia iparban az ASME szabvány kiterjedt kritérium rendszerét használják. Ezen kívül számos országban alkalmaznak saját módszereket a repedésszerű hibák értékelésére (pl. R6 – Nuclear Electric Ltd.). A csővezetékekkel kapcsolatban is számos nemzeti szabvány tartalmaz különböző kritériumokat a hibák veszélyességének megítélésére. [1]

A repedésszerű hibák értékelésére alkalmazott módszereket két nagy csoportra lehet osztani:

- hibaértékelő diagramon (failure assessment diagram – FAD) alapuló módszerek,
- nem FAD-alapú módszerek.

A nem FAD-alapú módszerek elve az, hogy a szerkezet terheléséből meghatározható valamilyen törésmechanikai paramétert (K_I , J_I , COD) hasonlítják össze a megfelelő anyagjellemzővel. Az FAD-alapú módszerek figyelembe veszik, hogy a szerkezeti elemek törése általában két határeset: a ridegtörés és a képlékeny összeomlás között történik. A két kritériumos hibaértékelő diagramokat (FAD) 1975-76-ban javasolták alkalmazni [2, 3] és a módszer az R6 nevet kapta. Azóta számos jelentős szabványosított eljárás alapul ezen a módszeren. [1]

Az R6 módszert először a Central Electricity Generating Board publikálta 1976-ban [2], amely alapvetően a nem magas hőmérsékleten üzemelő szerkezetekben lévő repedések értékelésére vonatkozik. Azóta az R6 módszerből kiindulva további eljárásokat is kifejlesztettek különböző üzemi és terhelési körülményekre [4]:

- R2 – váltakozó terhelésű szerkezetek integritása,
- R3 – értékelő eljárás külső nyomás és ütközés hatására bekövetkező károsodás esetére,
- R4 – a nukleáris erőművek integritása szeizmikus terhelés esetén,
- R5 – növelt hőmérsékleten üzemelő szerkezetekben lévő hibák értékelése.

Ezeket az eljárásokat ma már sok helyen rutinszerűen alkalmazzák, amit segítenek a mindenki számára hozzáférhető számítógépes programok (R6 Code – Nuclear Electric Ltd., IWM-Verb – Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik).

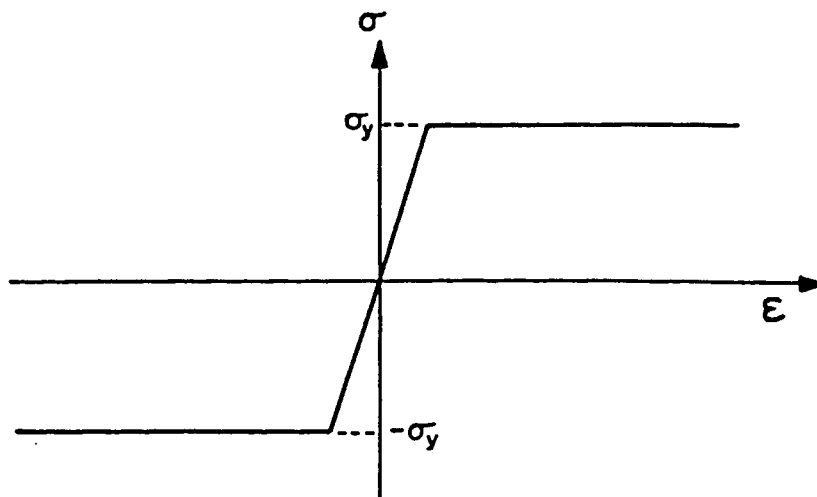
2. Az R6 módszer elvi alapjai

Az R6 módszer figyelembe veszi, hogy a szerkezeti elemek törése alapvetően kétféle mechanizmussal mehet végbe: rideg töréssel vagy képlékeny összeomlással. A módszer különválasztja a törésben közrejátszó ezen két tényezőt, vagyis külön értékeli - egy adott terhelés és repedésgeometria esetén - a ridegtörés illetve a képlékeny összeomlás bekövetkezésének közelségét (lehetőségét). [5]

Egy repedéssel rendelkező szerkezet törésének egyik lehetséges módja a **ridegtörés**. Ideálisan rideg viselkedést akkor tapasztalhatunk, ha a szerkezet lineárisan rugalmasan alakváltozik és a törést megelőzően nincs képlékeny alakváltozás. Ekkor a repedéscsúcsban a feszültségek szingulárisra válnak, a K feszültségintenzitási tényező jellemzi a feszültség-szingularitás mértékét. Teljesen rideg állapotban a repedés akkor stabil, ha $K < K_{\text{anyag}}$, ahol a K_{anyag} törési szívósság anyagjellemző. A ridegtöréssel szembeni biztonság a következő aránnyal jellemezhető:

$$K_r = \frac{K}{K_{\text{anyag}}} \quad (1)$$

Az R6 módszer a szerkezeti anyag **szívós viselkedését** rugalmas-ideálisan képlékeny anyagmodell alkalmazásával írja le. Ez azt jelenti, hogy a feszültség-alakváltozás diagram egytengelyű húzás esetén az 1. ábrának megfelelő alakú.



1. ábra

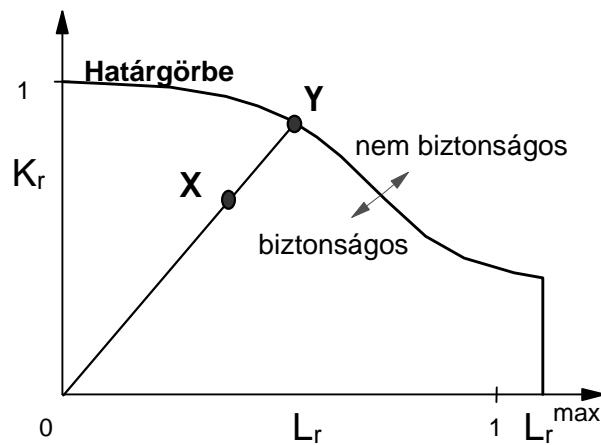
Rugalmas-ideálisan képlékeny anyag feszültség-alakváltozás görbéje egytengelyű húzásra

Ilyen esetben korlátlan képlékeny alakváltozás következik be, ha a szerkezeti elem valamely helyen teljes keresztmetszetében megfolyik. Ehhez a képlékeny összeomláshoz tartozó terhelés jelenti a terhelhetőség határát. Bármilyen Q terhelésnek (lehet az nyomás – P , húzóterhelés – N , vagy hajlítás – M) van egy határértéke $Q_L(\sigma_y)$ egy adott szerkezeti geometria és anyag esetén. A képlékeny összeomlással szembeni biztonság a következő aránnyal jellemezhető:

$$L_r = \frac{Q}{Q_L(\sigma_y)} \quad (2)$$

Képlékeny összeomlás hiba jelenléte nélkül is bekövetkezhet, amikor a szerkezet valamely keresztmetszetében teljesen megfolyik. Hiba esetén gyakorlatilag a teherviselő keresztmetszet csökkenése következik be.

A valóságban a szerkezetek anyagainak viselkedése sem nem tökéletesen rideg, sem nem teljesen szívós. Ez szemléltethető a hibaértékelő diagram (FAD) segítségével (2. ábra). Egy adott terheléshez tartozó K_r és L_r értékeket ábrázolva a diagramban (X pont), ha a pont a határgörbe, a tengelyek valamint az L_r^{\max} határérték által meghatározott területbe esik, akkor a szerkezet biztonságos. Ha a terhelés nő, az X értékelési pont közeledik a határgörbe felé, s amikor eléri azt, a szerkezet integritása már nem garantálható, törés következhet be.



2. ábra
Az R6 hibaértékelő diagram

Az L_r^{\max} levágási érték alkalmazása az R6 diagramban az alakítási keményedés figyelembe vételét célozza képlékeny összeomlás esetén. A szerkezet képlékeny összeomlása a gyakorlatban nem következik be a folyáshatár elérésekor keményedő anyag esetén. Egy valószínűbb határterhelés az, amikor a feszültség eléri az ún. folyási feszültséget ($\bar{\sigma}$ - flow stress), amit a folyáshatár és a szakítószilárdság átlagaként definiálnak. Ha a $\bar{\sigma}$ határfeszültséget alkalmazzuk, a határterhelés $Q_L(\bar{\sigma})$ lesz, mivel a a töréshez tartozó terhelés arányos a határfeszültséggel. Így:

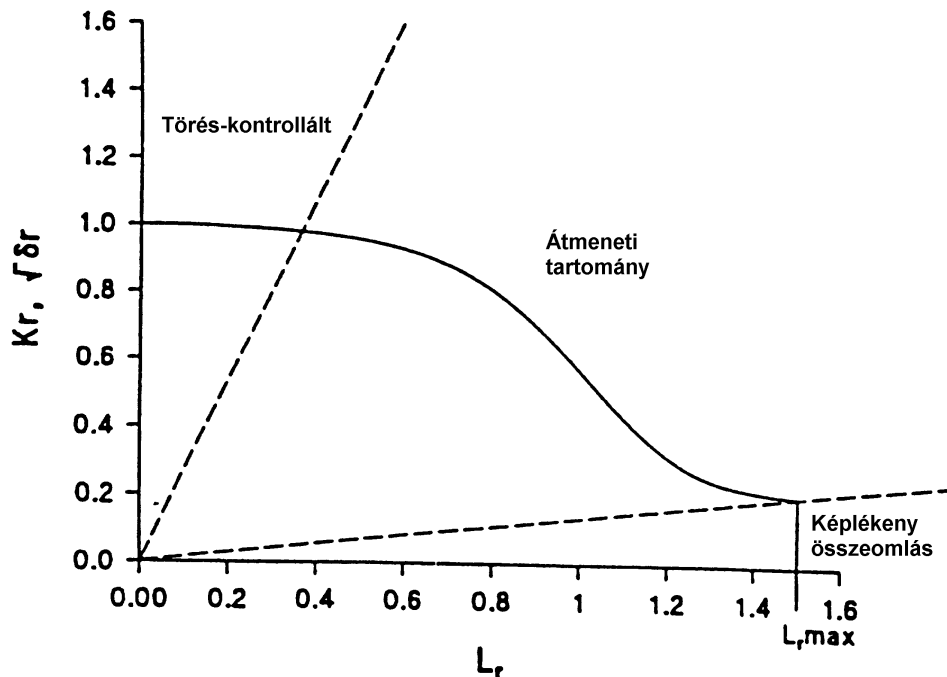
$$\frac{Q_L(\bar{\sigma})}{Q_L(\sigma_y)} = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_y} \quad (3)$$

Az R6 módszer tehát a teljesen képlékeny törést a $K_r=0$ és $L_r=L_r^{\max}$ értékeknél jósolja a következő határérték figyelembe vételével:

$$L_{r \max} = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_y} \quad (4)$$

Ez azt jelenti, hogy az R6 módszer megengedi a képlékeny alakváltozást egészen a $Q_L(\bar{\sigma})$ határterhelésig.

Az R6 diagram segítségével a meghatározó törési mechanizmusról is információt nyerhetünk (3. ábra [6]).

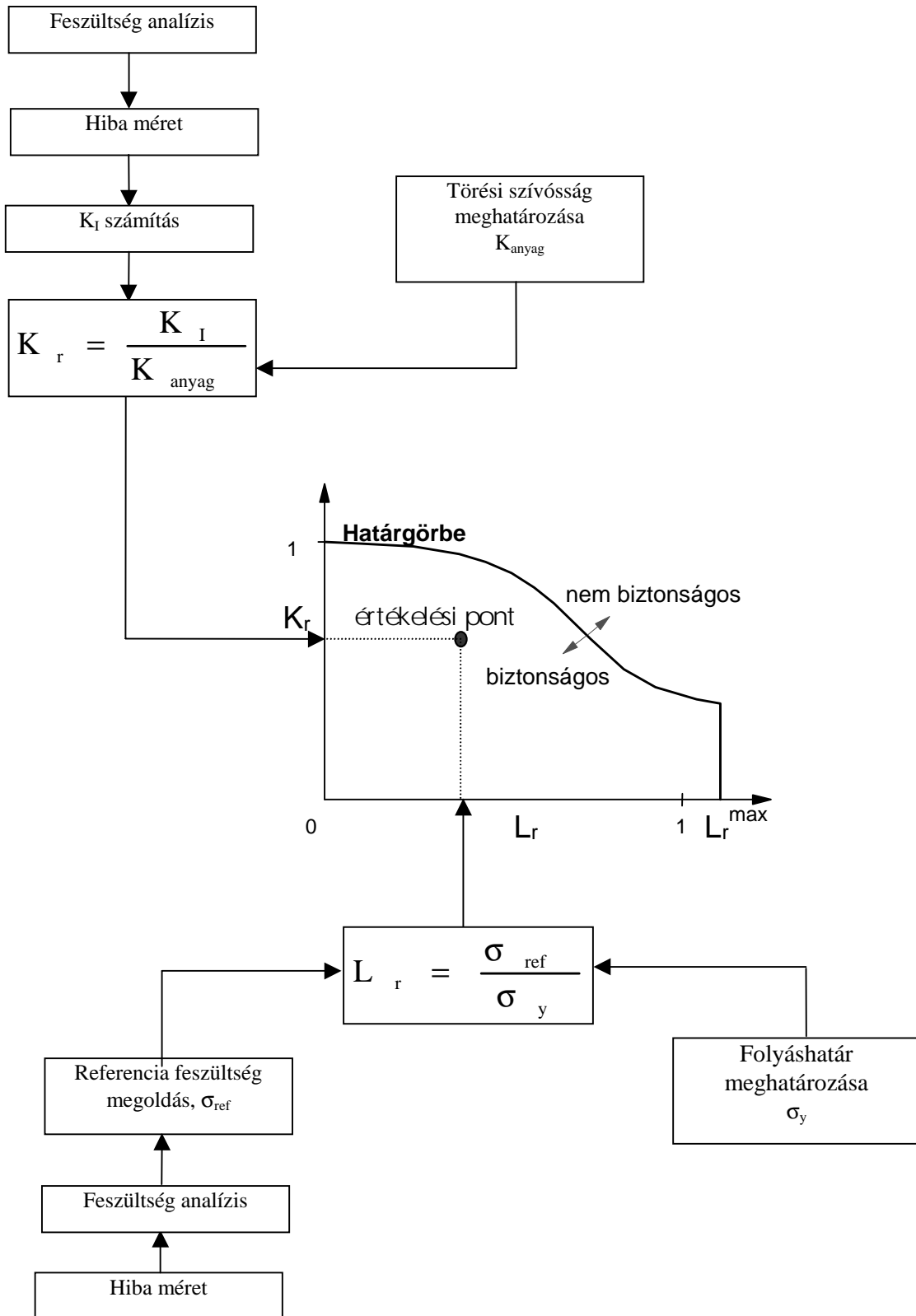


3. ábra

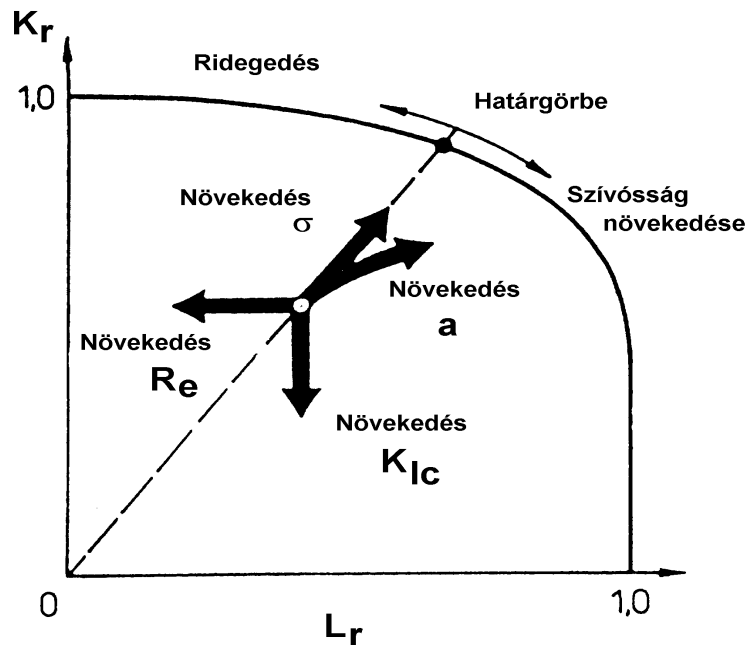
A különböző törési mechanizmusok megállapítása az R6 diagram alapján

Ha az értékelési pontunk a diagram bal felső sarkába esik, akkor a végső tönkremenetelt törés okozza. Ha a jobb alsó sarokban van az értékelési pont, akkor inkább képlékeny összeomlás veszélye fenyeget. A közbenső tartományban a két mechanizmus együtt játszik szerepet.

Az R6 módszer (de általában az FAD alapú módszerek) alkalmazásához ismerni kell a megfelelő K és határterhelés megoldásokat. Ezt a leggyakrabban előforduló szerkezeti geometriákra hozzáférhető törésmechanikai és mechanikai összefüggések alkalmazásával tehetjük meg. A 4. ábra azt szemlélteti, hogy egy repedéssel rendelkező szerkezetre vagy szerkezeti elemre hogyan kell elvégezni egy „fitness-for-service” (üzemelési alkalmasság) elemzést [1].



4. ábra
 Repedéssel rendelkező szerkezeti elem „fitness-for-service” analízise
 hibaértékelő diagram segítségével



5. ábra

A terhelési és anyagi paraméterek hatása az értékelési pont helyzetére

A különböző terhelési és anyagi paraméterek hatását szemlélteti az 5. ábra. Ebből kiolvasható, hogy:

- A folyáshatár növekedése az értékelési pont helyzetét balra tolja, vagyis növeli a képlékeny összeomlással szembeni biztonságot.
- A törési szívósság növekedése az értékelési pont helyzetét lefelé tolja, vagyis növeli a töréssel (repedésterjedéssel történő) szembeni biztonságot.
- Ha a terhelés egyparáméteres (pl. csak húzás vagy belső nyomás), akkor a terhelés növelése az értékelési pont helyzetét az origóból induló egyenes mentén a határgörbe felé tolja, így csökkentve a tönkremenetellel szembeni biztonságot. Az egyenesnek a határgörbével való metszéspontja jelöli ki a tönkremenetelhez tartozó határterhelést.
- A repedéméret növekedése az értékelési pont helyzetét szintén a határgörbe felé mozdítja el egy görbe vonal mentén, egyaránt csökkentve a képlékeny összeomlással szembeni és a töréssel (repedésterjedéssel történő) szembeni biztonságot.

3. Határgörbék

R6, 1. Opció:

$$K_r = \left(1 - 0.14L_r^2\right) \left[0.3 + 0.7 \exp(-0.65L_r^6)\right], \text{ ha } L_r \leq L_r^{\max}$$

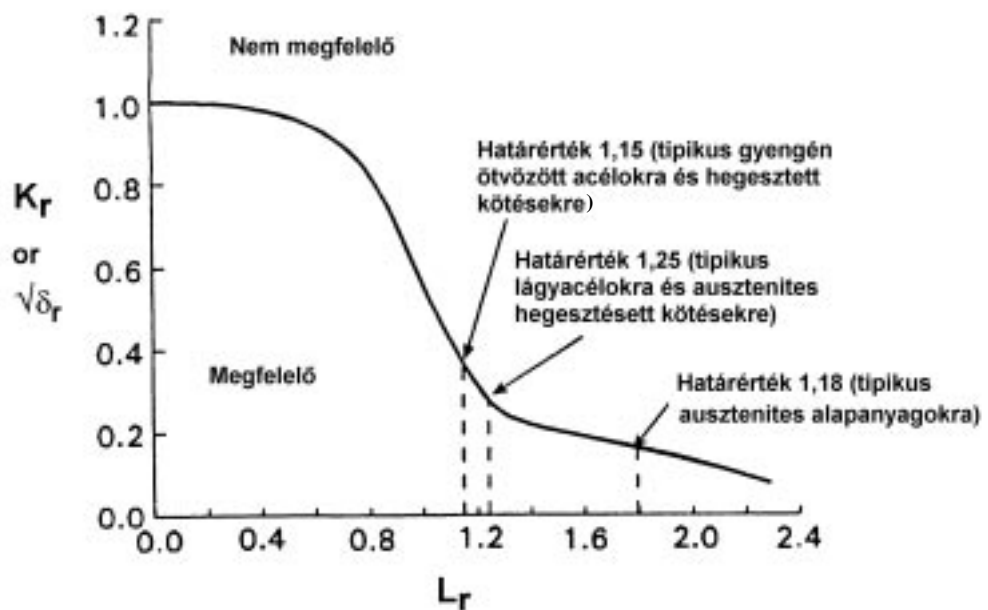
$$K_r = 0, \text{ ha } L_r > L_r^{\max}$$

$$L_r^{\max} = (R_{p0.2} + R_m) / (2R_{p0.2})$$

ahol $R_{p0.2}$ – az anyag egyezményes folyáshatára, MPa

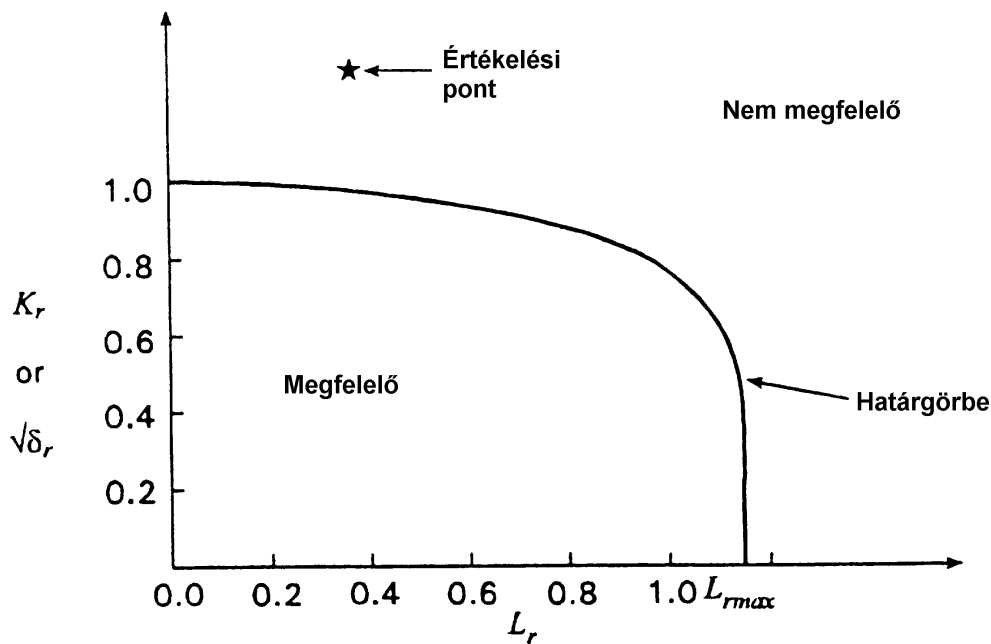
R_m – az anyag szakítószilárdsága, MPa.

Alkalmazás: azokra az anyagokra, amelyeknek nagy a kezdeti alakítási keményedése vagy a valódi feszültség-nyúlás görbe nem ismert (6. és 7. ábra). Nem alkalmazható olyan anyagokra, amelyek első folyáshatárral rendelkeznek (Lüders alakváltozás).



6. ábra

Általános FAD nagyobb alakítási keményedésű anyagokra



7. ábra

Általános FAD kis alakítási keményedésű anyagokra ($\bar{\sigma} \leq 1,2\sigma_y$)

R6, 2. Opció:

$$K_r = \left[E \varepsilon_{\text{ref}} / (L_r R_{p0.2}) + L_r^3 R_{p0.2} / (2E \varepsilon_{\text{ref}}) \right]^{-1/2}, \text{ ha } L_r \leq L_r^{\text{max}}$$

$$K_r = 0, \text{ ha } L_r > L_r^{\text{max}}$$

$$L_r^{\text{max}} = (R_{p0.2} + R_m) / (2R_{p0.2})$$

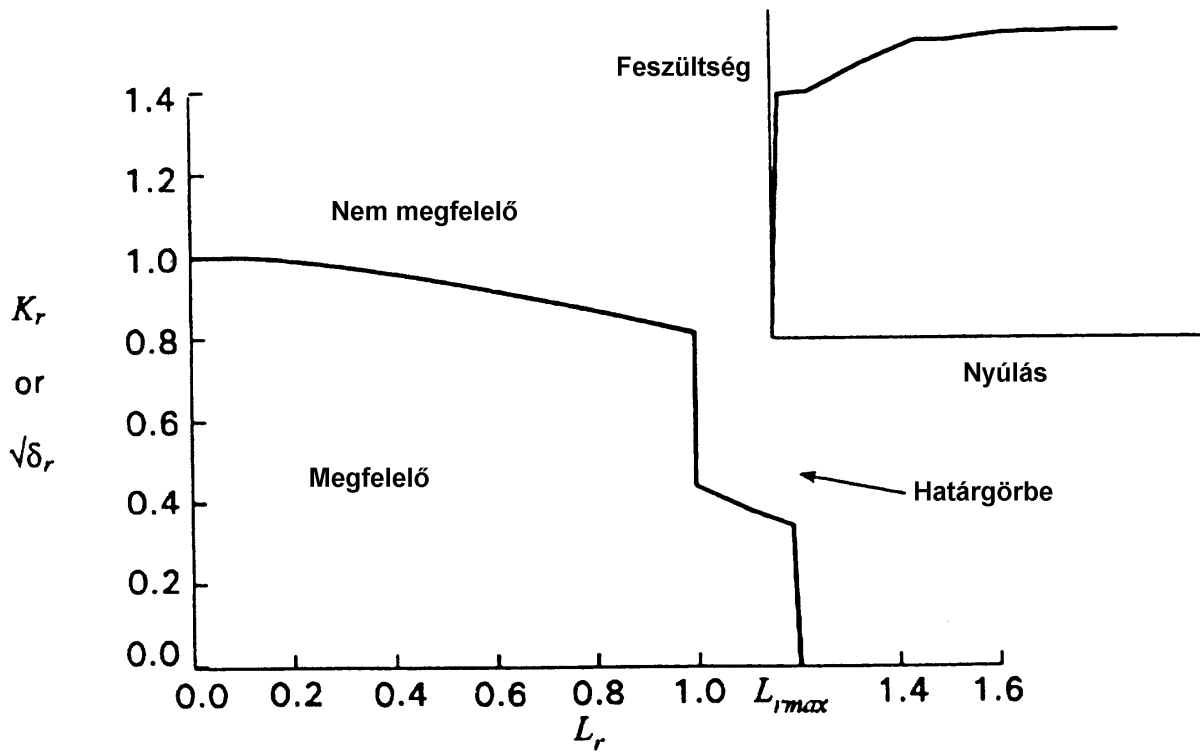
ahol $R_{p0.2}$ – az anyag egyezményes folyáshatára, MPa

R_m – az anyag szakítószilárdsága, MPa

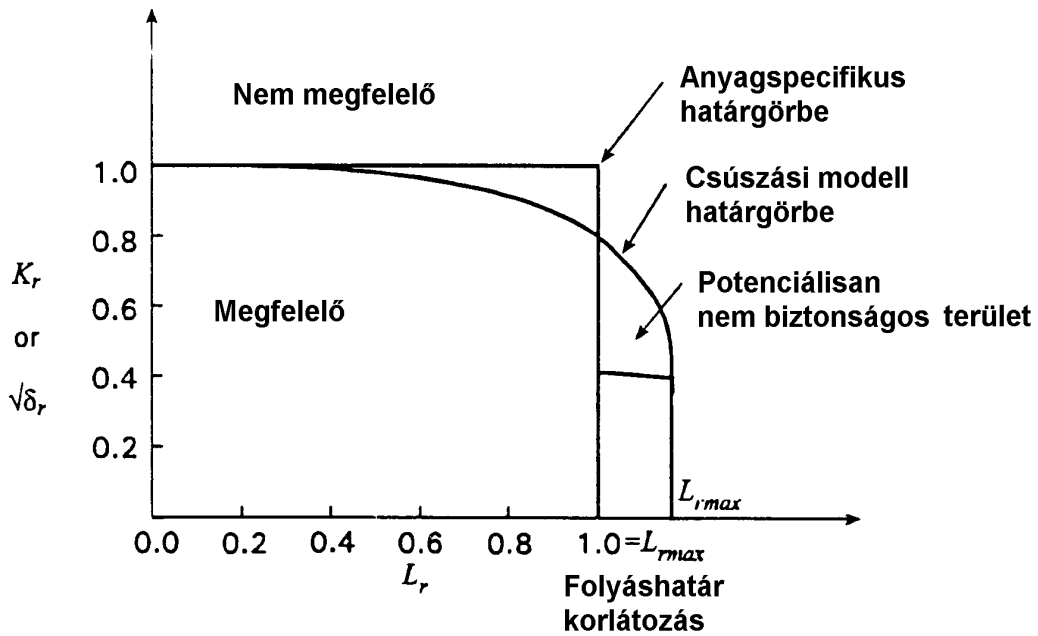
E – rugalmassági modulus, MPa

ε_{ref} – valódi alakváltozás a szakítóvizsgálat feszültség-alakváltozás diagramjából meghatározva az $L_r R_{p0.2}$ valódi feszültségnél.

Alkalmazás: azoknál az anyagoknál, amelyek kismértékben keményednek vagy alsó folyáshatárral rendelkeznek, és a valódi feszültség-nyúlás görbe ismert (8. és 9. ábra).



8. ábra
Anyag-specifikus FAD



9. ábra
Anyag-specifikus FAD alsó folyáshatárral rendelkező anyagokra

R6, 3. Opció:

A J-integrált alkalmazza adott terhelés és geometria esetén. A J-integrálból a következő összefüggéssel állítja elő a határgörbét:

$$K_r = (J_{\text{elastic}}/J)^{1/2}$$

Alkalmazás: ha a J-integrál – terhelés függvény ismert az adott geometriára.

R6, B melléklet:

$$K_r = (1 - 0.1L_r^2 + 0.1L_r^4)/(1 + 3L_r^4), \text{ ha } L_r \leq 1$$

$$K_r = 0, \text{ ha } L_r > 1$$

A folyási feszültségként $\sigma_F = (R_{p0.2} + R_m)/2$ van figyelembe véve a folyáshatár helyett.

Alkalmazás: öregedő C-Mn acélok esetén, ha a valódi feszültség-nyúlás görbe nem ismert.

4. Irodalomjegyzék

- [1] P. Scott, G- Wilkowsky, T. Andeson, D- Osage: A review and validation of existing flaw evaluation criteria for crack-like flaws for pressure retaining equipments
50th Annual Assembly of IIW, San Francisco, 1997. július.
- [2] A. R. Dowling, C. H. A. Townley: The effects of defects on structural failure
International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 3., pp. 77-137, 1975.
- [3] R. P. Harrison, K, Loosemore, I. Milne: Assessment of the integrity of structures containing defects
CEGB Report R/H/R6, Central Electricity Generating Board, UK, 1976.
- [4] T.C. Chivers, K. Fullard, D. L Thomas: An overview of some structural integrity assessment procedures and the experimental program supporting them
- [5] Manual fo R6 Code, Nuclear Electric Ltd.
- [6] C. S. Wiesner, R. Phaal, S. J. Garwood: Revisions to the fracture clauses of BSI PD6493:1991 assessment procedures
50th Annual Assembly of IIW, San Francisco, 1997. július.

5. Mintapéldák

5.1. Egyirányban végtelen hosszú lemez, közepén elhelyezkedő elliptikus repedéssel – egytengelyű húzás (IWM VERB programmal)

Anyagjellemzők:

Anyagminőség: 10 Cr Mo 9 10

$R_{p0.2} = 430$ MPa

$R_m = 600$ MPa

$E = 210000$ MPa

$K_{Jc} = 150$ MPa \sqrt{m}

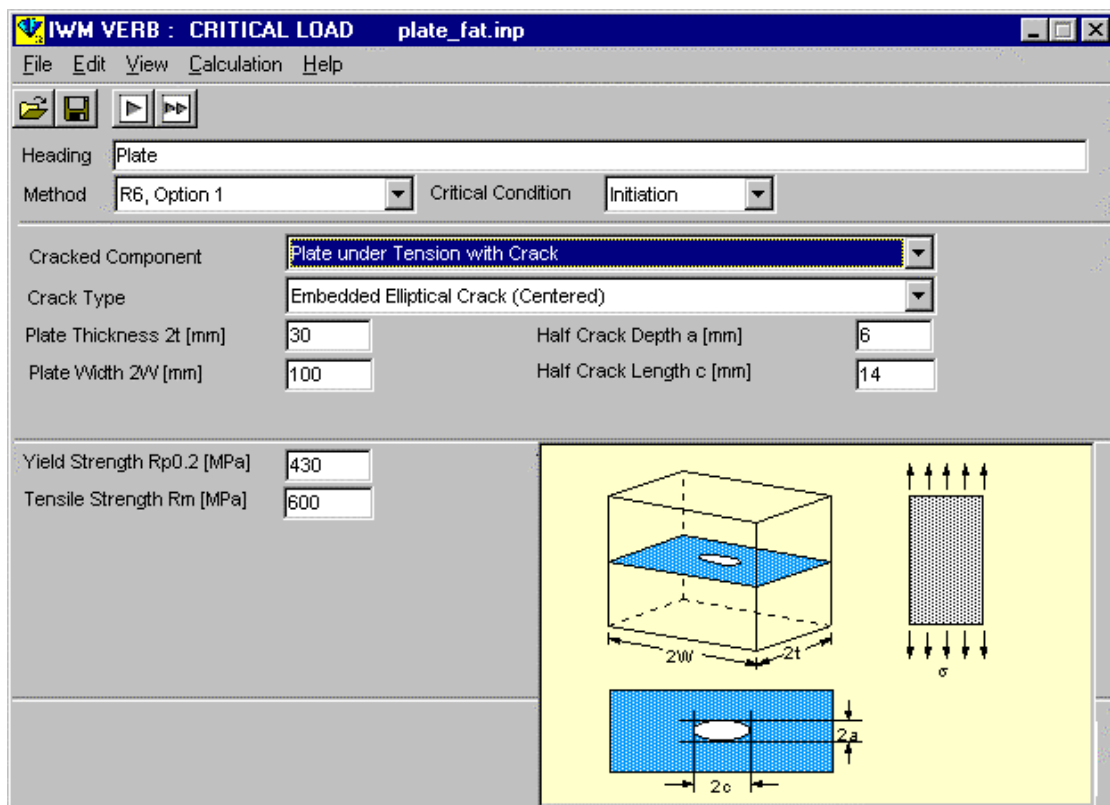
Méretek: (Isd. 1.1. ábra):

$2W = 100$ mm (lemez szélessége)

$2t = 30$ mm (lemezvastagság)

$a = 6$ mm

$c = 14$ mm



1.1.ábra
Kiinduló adatok

1. számítás: hibaértékelés

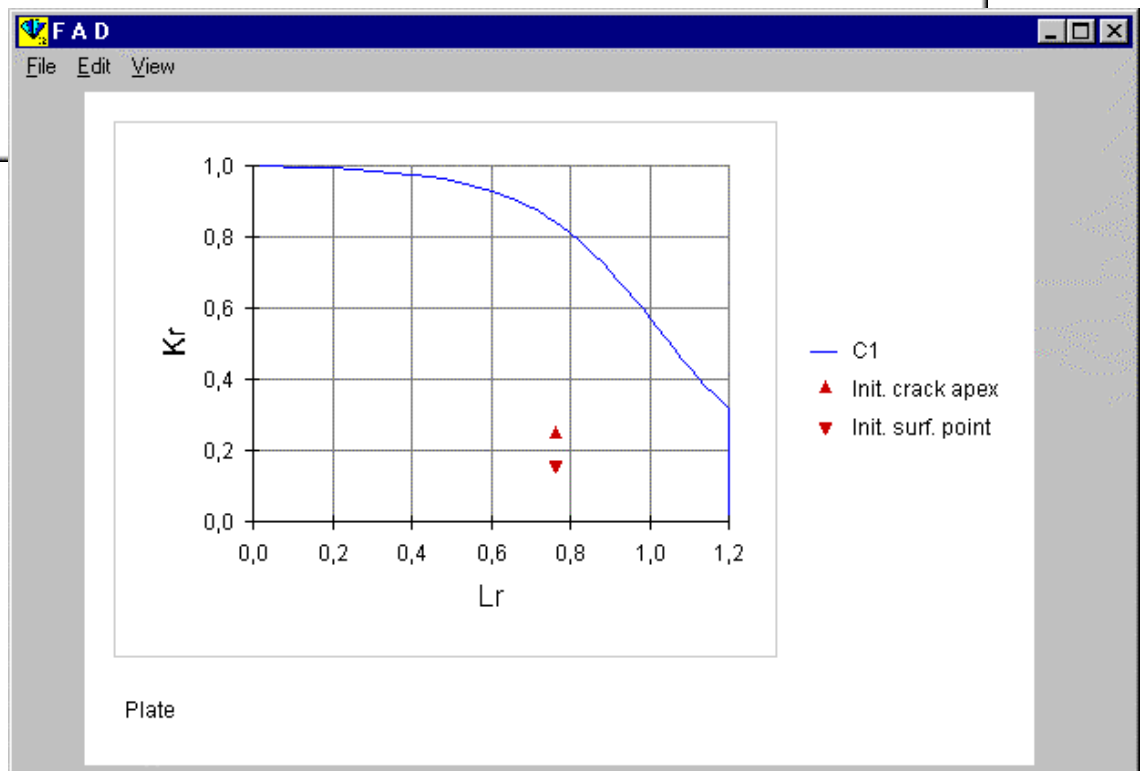
300 MPa terhelés esetén biztonságos-e a szerkezeti elem?

OUTPUT : Page 3 of 3

Results:

| Half crack depth a [mm] | Assessment point | |
|-------------------------------|------------------|--------|
| | Lr | Kr (a) |
| 6,0 | 0,7596 | 0,2484 |

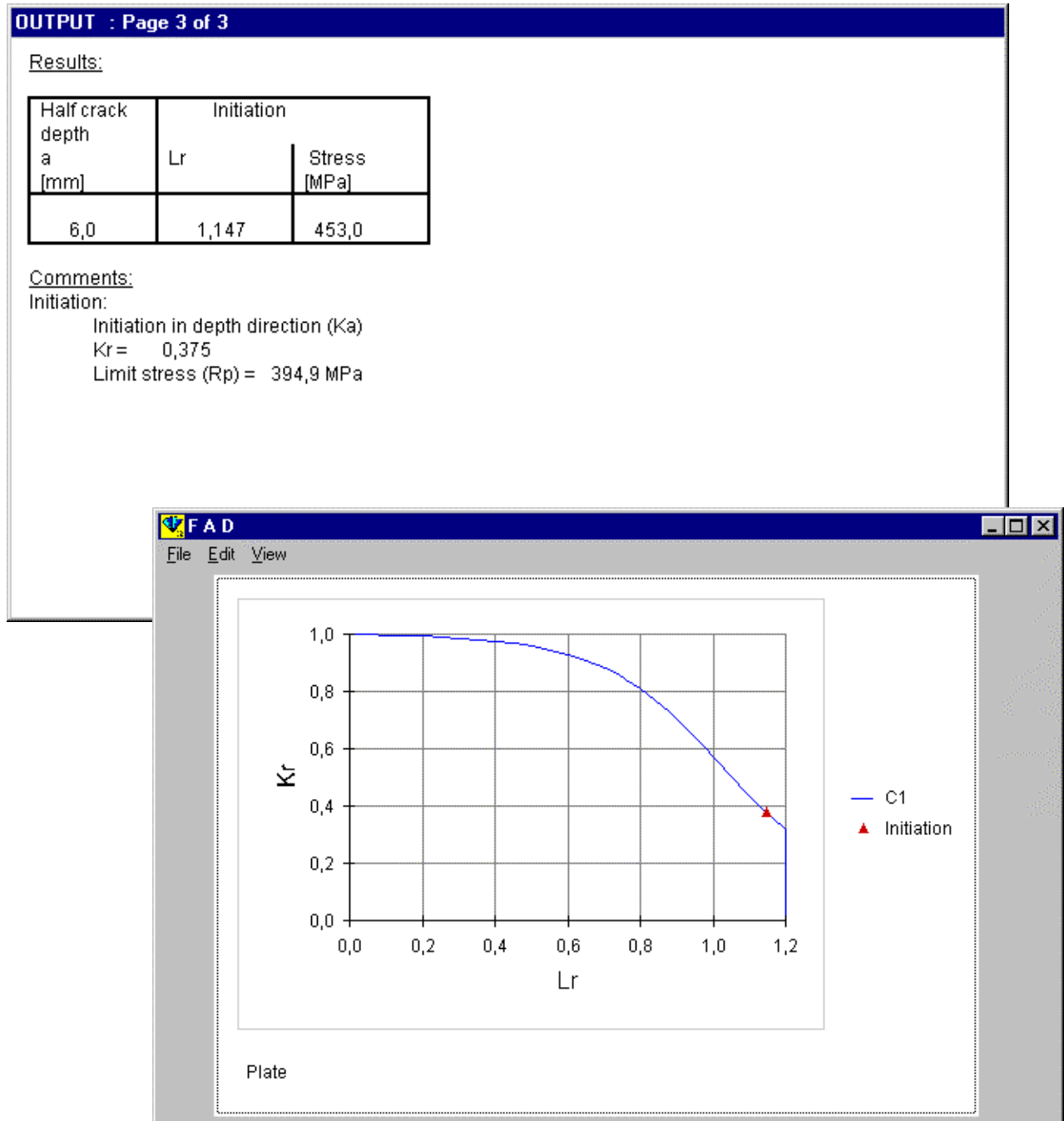
Comments:
 Kr (c) = 0,1611
 More critical conditions were found for depth direction (Ka)
 Limit stress (Rp) = 394,9 MPa

**Megjegyzés:**

Az adott terhelés esetén nem következik be törés.
 A hiba veszélyesebb mélység irányban (felső pont).

2. számítás: repedésinduláshoz tartozó kritikus terhelés meghatározása

Mennyi a kiinduló repedésmérethez tartozó kritikus feszültség értéke?



Megjegyzés:

A próbatest károsodása repedésnövekedéssel kezdődik, a repedésindulás 453 MPa határterhelésnél következik be.

A törés kiindulási helye – vastagságirányban ('2a' irányban).

3. számítás: kritikus repedéshossz meghatározása

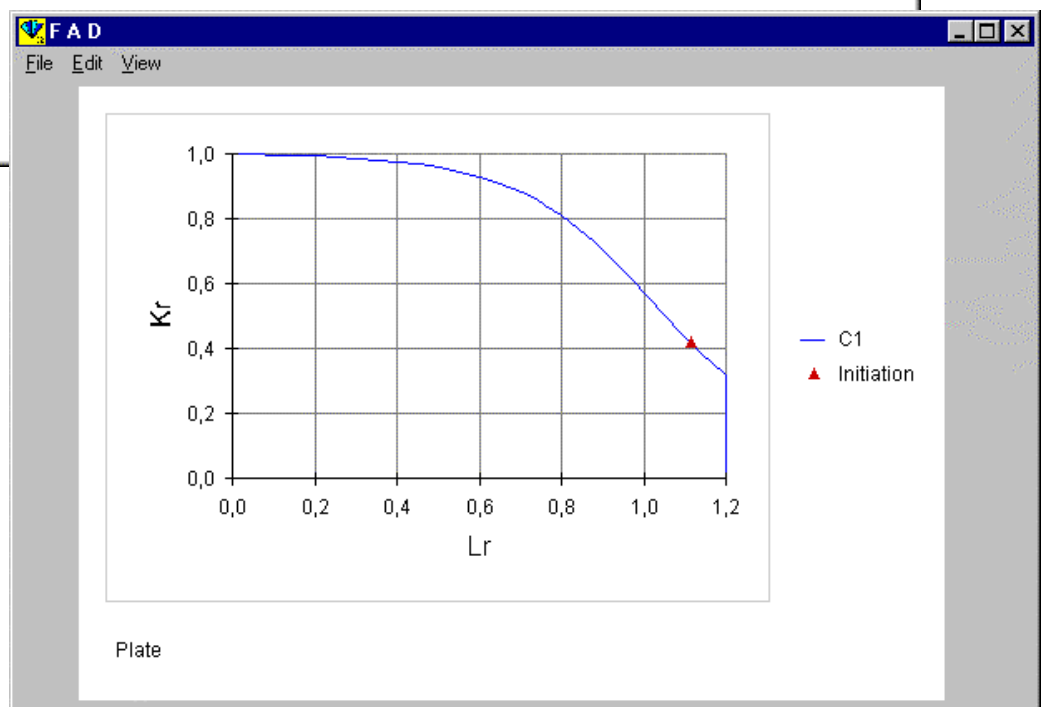
300 MPa terheléshez tartozó kritikus repedéshossz számítása.

OUTPUT : Page 3 of 3

Results:

| Half crack depth a [mm] | Initiation | |
|-------------------------------|------------|-----------------|
| | Lr | Stress [MPa] |
| 11,93 | 1,114 | 299,2 |

Comments:
Initiation:
Initiation in depth direction (Ka)
Kr = 0,4157
Limit stress (Rp) = 268,5 MPa



Megjegyzés:

Az adott terhelés esetén a kritikus repedéshossz kb. 12 mm mélységirányban. A törés kiindulási helye – vastagságirányban ('2a' irányban). $a/c = \text{konstans}$.

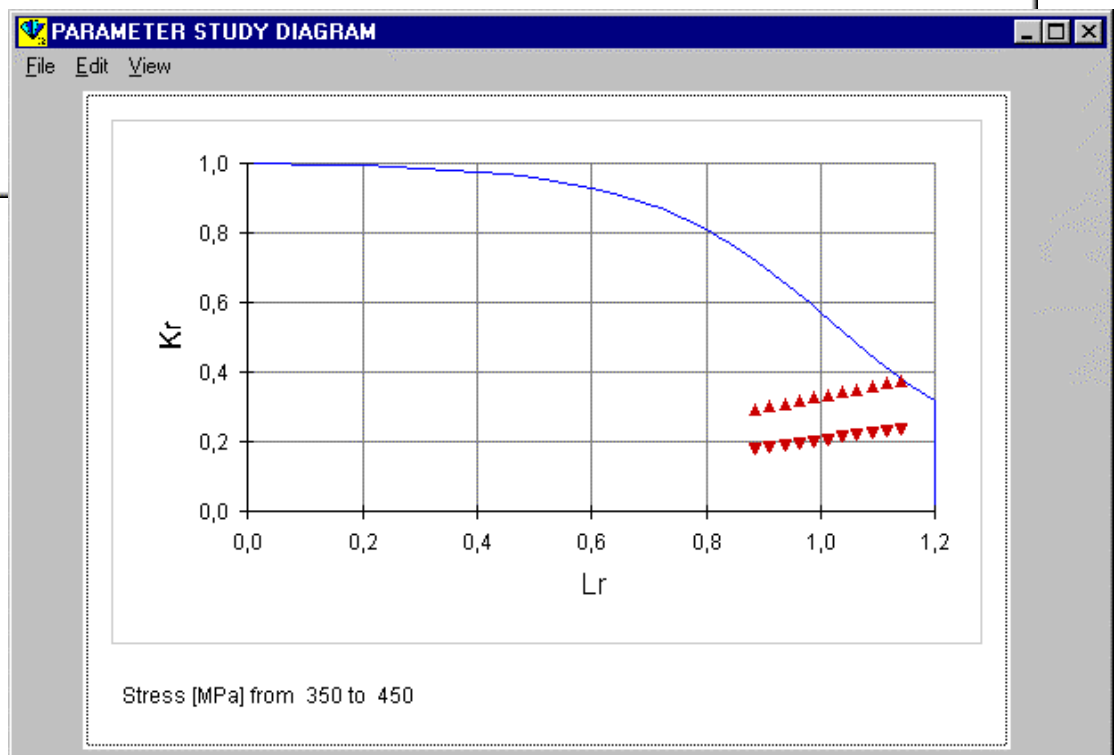
4. számítás: a feszültségváltozás hatásának elemzése

Hogyan változik az értékelési pont(ok) helyzete a feszültség növekedés hatására: 350 MPa-tól 450 MPa-ig növelve a feszültséget?

OUTPUT : Page 3 of 3

Parameter Study Results:

| Stress [MPa] | Lr | Kr(a) | Kr(c) |
|--------------|--------|--------|--------|
| 350,0 | 0,8862 | 0,2898 | 0,1879 |
| 360,0 | 0,9115 | 0,298 | 0,1933 |
| 370,0 | 0,9368 | 0,3063 | 0,1986 |
| 380,0 | 0,9622 | 0,3146 | 0,204 |
| 390,0 | 0,9875 | 0,3229 | 0,2094 |
| 400,0 | 1,013 | 0,3312 | 0,2147 |
| 410,0 | 1,038 | 0,3394 | 0,2201 |
| 420,0 | 1,063 | 0,3477 | 0,2255 |
| 430,0 | 1,089 | 0,356 | 0,2309 |
| 440,0 | 1,114 | 0,3643 | 0,2362 |
| 450,0 | 1,139 | 0,3726 | 0,2416 |

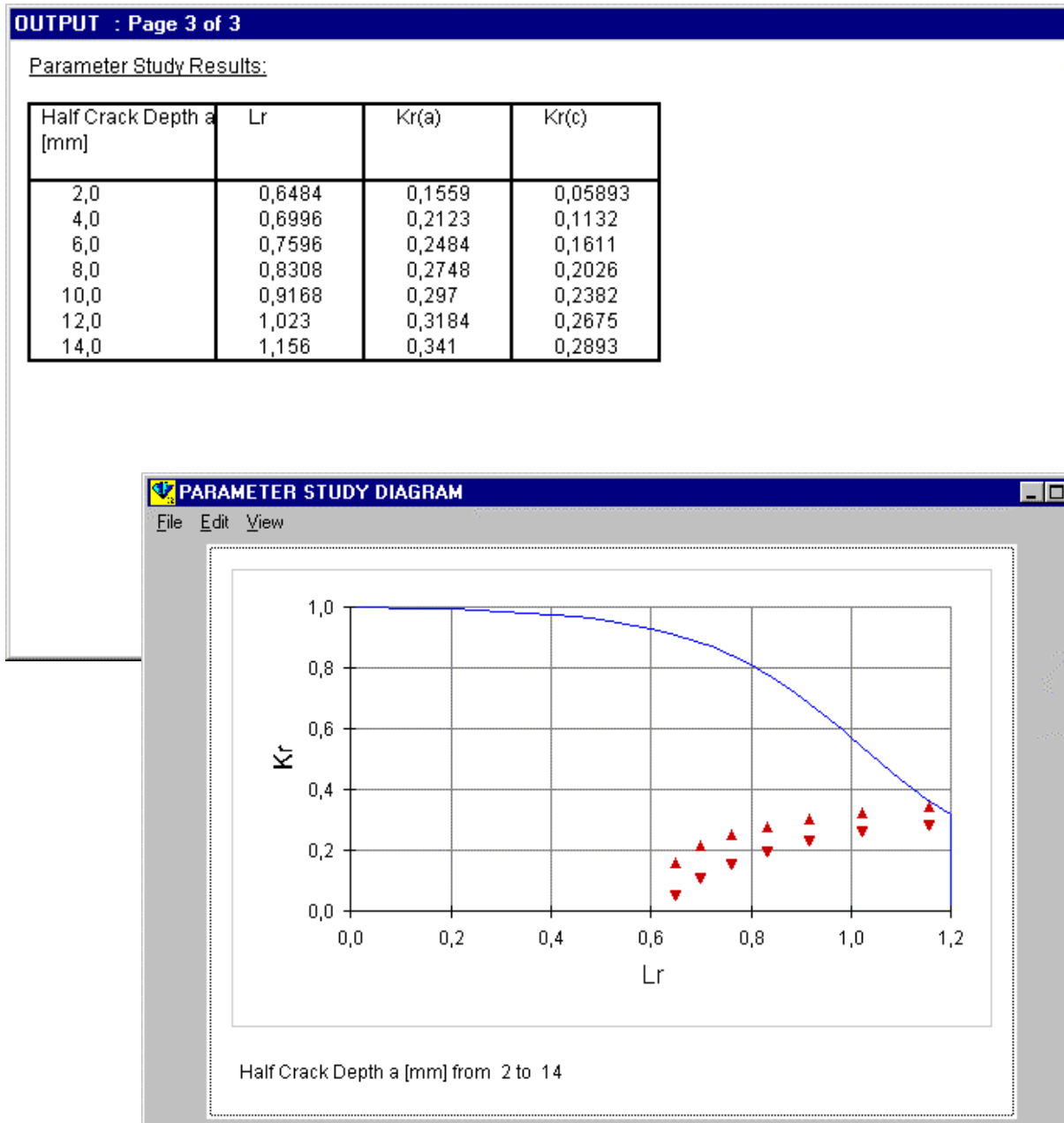


Megjegyzés:

A felső pontsor mutatja a helyzetet mélység irányban, az alsó pontsor vastagság irányban.

5. számítás: a repedéshossz változás hatásának elemzése

Hogyan változik az értékelési pont helyzete a mélységirányú repedésméret növekedésének hatására: 6 mm-től 12 mm-ig növelve a repedésméretet? (300 MPa terhelésnél)



Megjegyzés:

A felső pontsor mutatja a helyzetet mélység irányban, az alsó pontsor vastagság irányban.
 $a/c = \text{konstans}$

**5.2. Hengeres alumínium tartály körvarrattal – axiális repedéssel
(IWM VERB programmal)**

Anyagjellemzők:

Anyagminőség: Al Mg 4,5 Mn
Üzemelési hőmérséklet: -196 °C

| | Young modulus | T, °C | R _{p0.2} , MPa | R _m , MPa | A, % | Z, % | KV, J | |
|-----------|---------------|-------|-------------------------|----------------------|------|------|-------|----|
| Alapanyag | 73200 | 20 | 145 | 312 | 20 | 23 | 38 | 38 |
| | 83000 | -196 | 160 | 410 | 24 | 19 | 34 | 34 |
| Varrat | 69000 | 20 | 145 | 295 | 29 | 40 | 22 | 29 |
| | 77000 | -196 | 165 | 297 | - | - | 10 | 15 |

Törésmechanikai jellemzők:

| Anyag Al Mg 4,5 Mn | T, °C | J _{Ic} , kJ/m ² | K(J _{Ic}), MPa√m | T-modulus |
|-----------------------|-------|-------------------------------------|----------------------------|-----------|
| Alapanyag | 20 | 45 | 56 | 63 |
| | -196 | 53 | 64 | 79 |
| Varrat, belül | 20 | 30 | 47 | 32 |
| | -196 | 32 | 52 | 50 |
| Varrat, fedőréteg | 20 | 36 | 52 | 50 |
| | -196 | 36 | 55 | 51 |

J-R görbe: $J_R = 73\Delta a^{0.4692}$.

Méreték: (ld. 2.1. ábra):

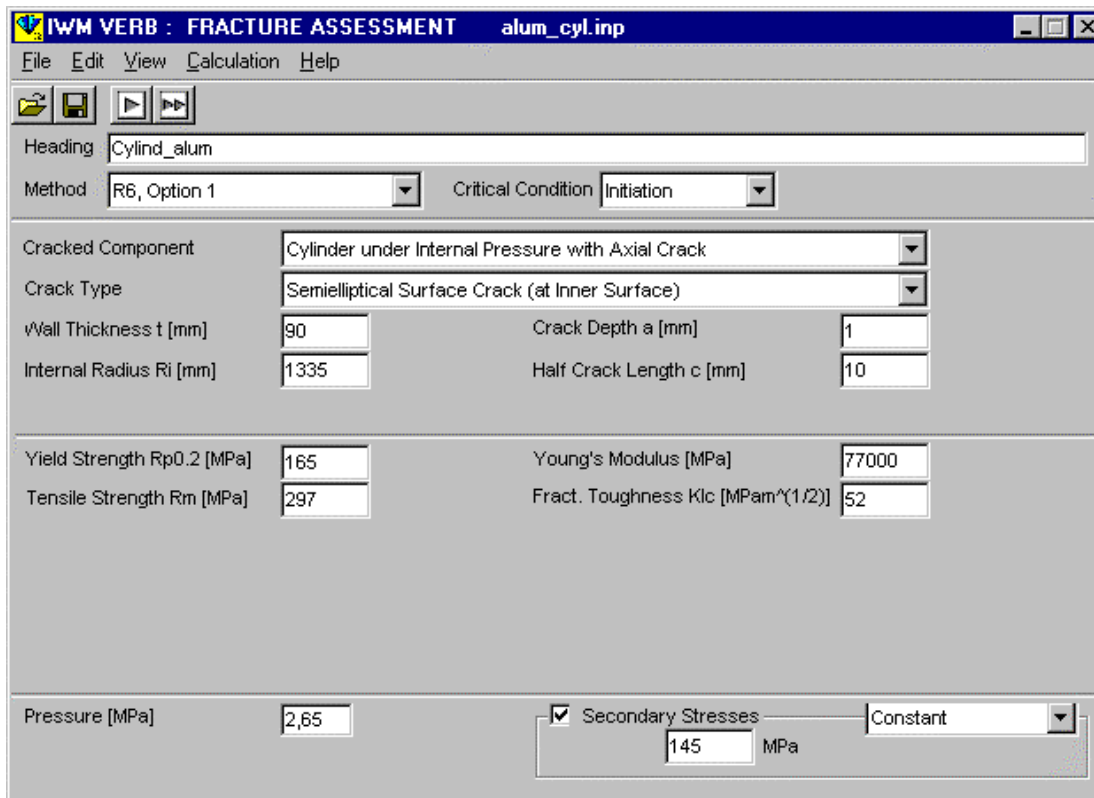
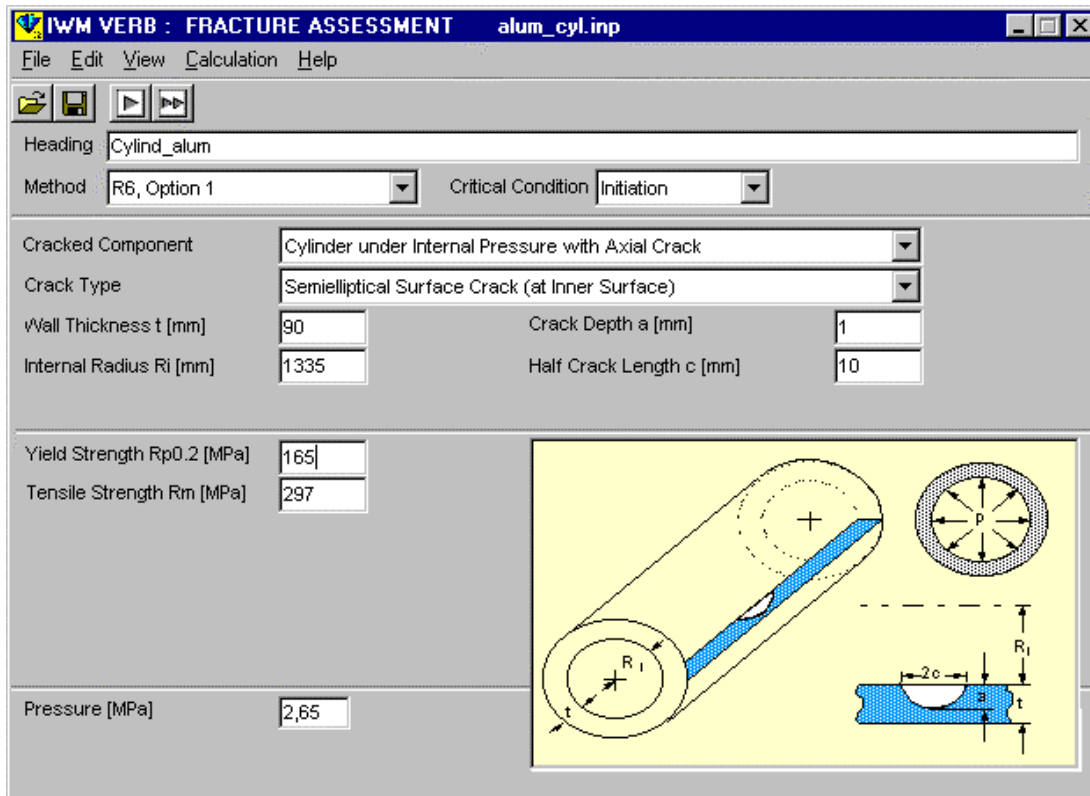
D= 2670 mm (belső átmérő)
t = 90 mm (falvastagság)

Hegesztési varratban előfordulhat repedés, legkisebb detektálható repedésméret:

a = 1 mm
c = 10 mm

Üzemi terhelés:

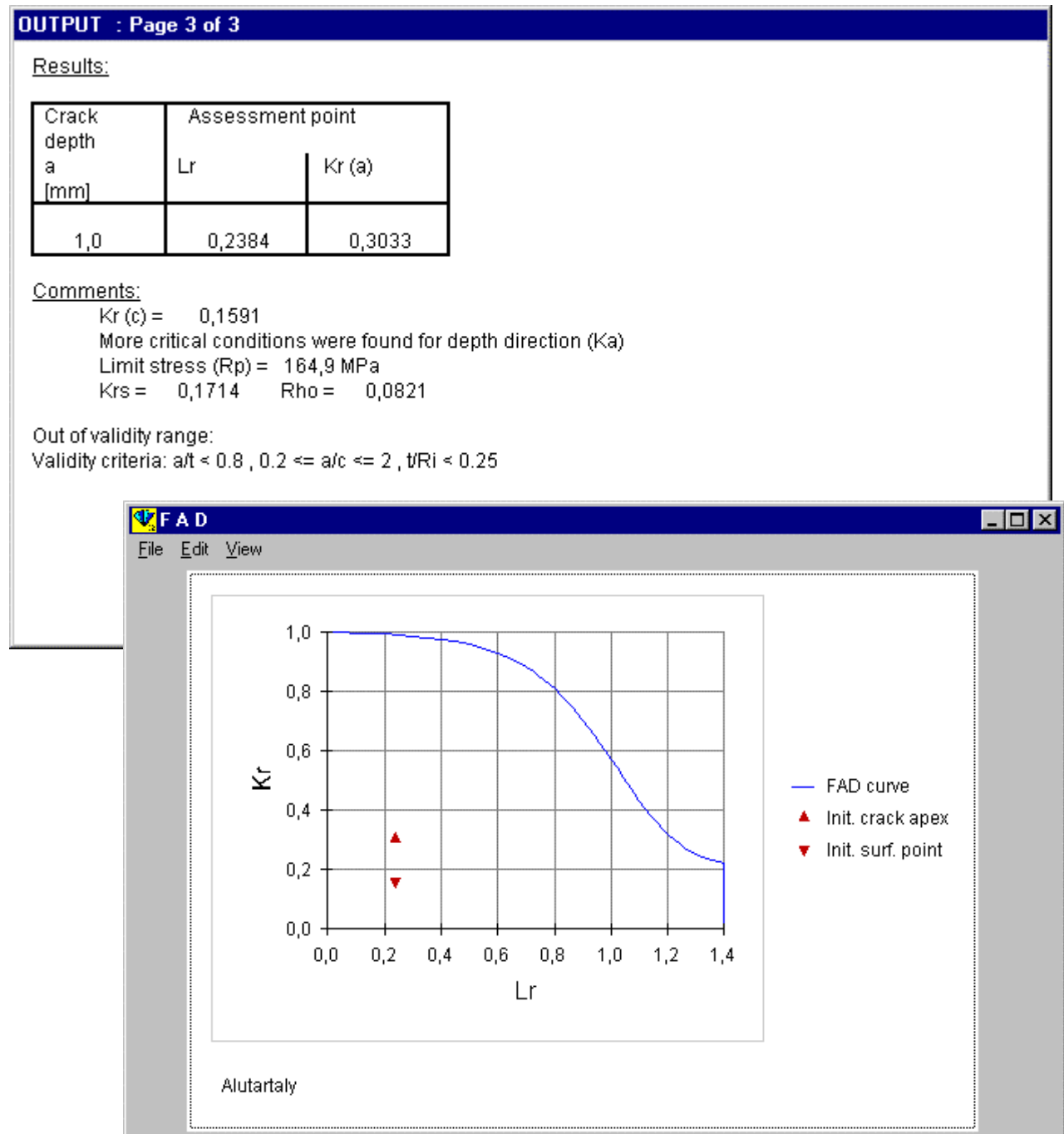
Belső nyomás: 2,65 MPa
Maradó feszültség jelenléte: 145 MPa (20 °C-on a folyási feszültség)



2.1. ábra
Kiinduló adatok

1. számítás: hibaértékelés

Az üzemi körülmények között mennyire biztonságos a hegesztési varratban repedéssel rendelkező tartály (a repedés mérete a legkisebb detektálható repedésméret)?



Megjegyzés:

Az adott terhelés esetén nem következik be törés.
 A hiba veszélyesebb mélység irányban (felső pont).
 (A repedésméret kívül esik az érvényességi tartományon.)

2. számítás: repedésinduláshoz tartozó kritikus terhelés meghatározása

Mennyi a legkisebb detektálható repedésmérethez tartozó kritikus nyomás érték?

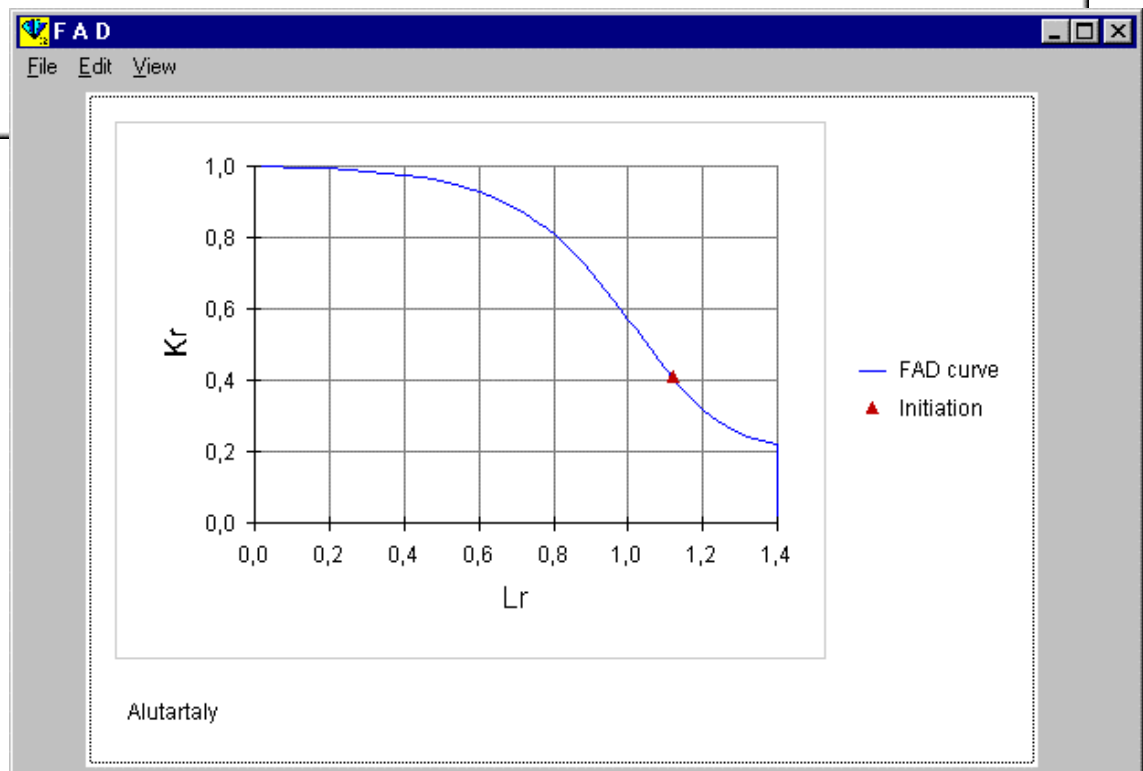
OUTPUT : Page 3 of 3

Results:

| Crack depth a [mm] | Initiation | |
|--------------------------|------------|-------------------|
| | Lr | Pressure [MPa] |
| 1,0 | 1,123 | 12,48 |

Comments:
Initiation:
Initiation in depth direction (Ka)
Kr = 0,406
Limit stress (Rp) = 164,9 MPa
Krs = 0,1714 Rho = 0

Out of validity range:
Validity criteria: $a/t < 0.8$, $0.2 \leq a/c \leq 2$, $t/Ri < 0.25$



Megjegyzés:

A próbatest károsodása repedésnövekedéssel kezdődik, a repedésindulás 12,48 MPa nyomásnál következik be.

A törés kiindulási helye – vastagságirányban ('2a' irányban).

(A repedésméret kívül esik az érvényességi tartományon.)

3. számítás: instabilitáshoz tartozó kritikus terhelés meghatározása

Milyen nyomásnál válik instabillá a megindult stabil repedésterjedés?

Ehhez meg kell adni a J-R görbe adatait:

The screenshot shows the 'IWM VERB: CRITICAL LOAD' software interface. The window title is 'IWM VERB: CRITICAL LOAD > alutart.inp'. The menu bar includes 'File', 'Edit', 'View', 'Calculation', and 'Help'. Below the menu bar are icons for file operations and calculation. The main interface is divided into several sections:

- Heading:** Alutartaly
- Method:** R6, Option 1
- Critical Condition:** Instability
- Crack Growth:** a/c constant
- Cracked Component:** Cylinder under Internal Pressure with Axial Crack
- Crack Type:** Semielliptical Surface Crack (at Inner Surface)
- Wall Thickness t [mm]:** 90
- Crack Depth a [mm]:** 1
- Internal Radius Ri [mm]:** 1335
- Half Crack Length c [mm]:** 10
- Yield Strength Rp0.2 [MPa]:** 165
- Young's Modulus [MPa]:** 77000
- Tensile Strength Rm [MPa]:** 297
- J-Resistance Curve:** Power law
 - C [kN/m]:** 73
 - N:** 0,4692
 - Ji [kN/m]:** 32
 - Max. Crack Extension [mm]:** 3
- Secondary Stresses:** Constant
 - Value:** 145 MPa

OUTPUT : Page 3 of 3

Results:

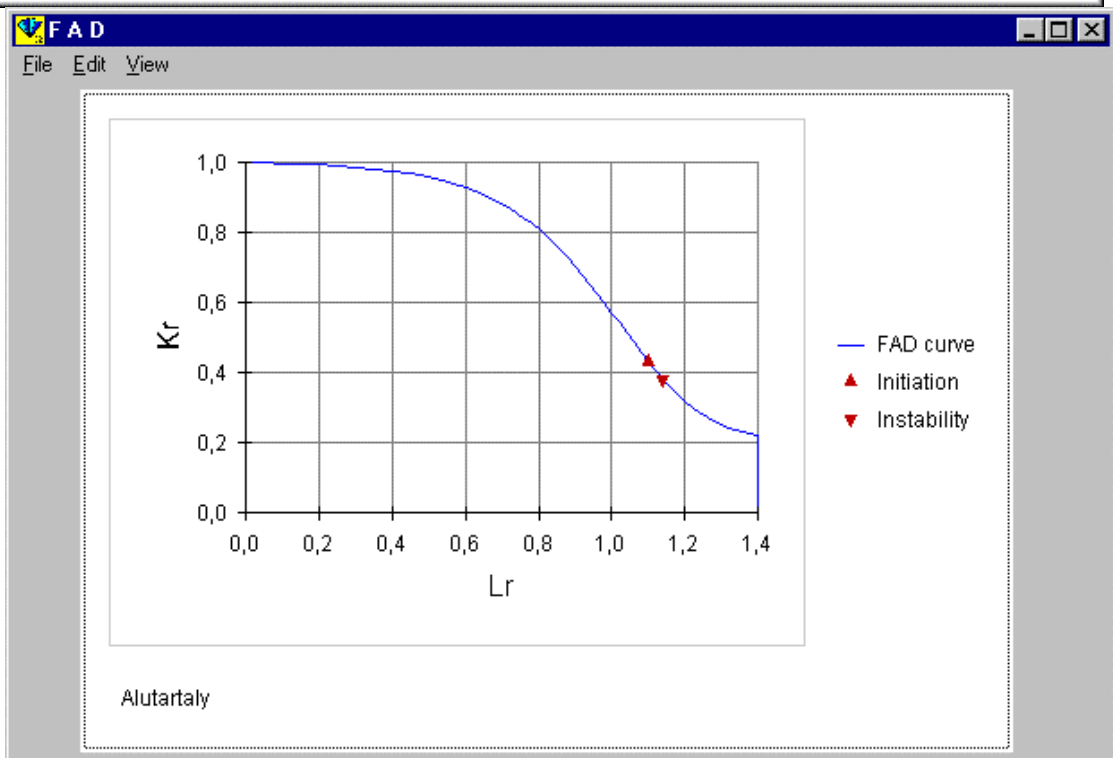
| Crack depth a [mm] | Initiation | | Stable crack growth | | Instability | |
|--------------------------|------------|----------------|---------------------|---------|-------------|----------------|
| | Lr | Pressure [MPa] | da [mm] | dc [mm] | Lr | Pressure [MPa] |
| 1,0 | 1,101 | 12,24 | 0,8724 | 8,724 | 1,142 | 12,68 |

Comments:

Initiation:
 Initiation in depth direction (Ka)
 Kr = 0,4316
 Limit stress (Rp) = 164,9 MPa
 Krs = 0,1843 Rho = 0

Instability:
 Kr = 0,3829
 Limit stress (Rp) = 164,8 MPa
 Krs = 0,1601 Rho = 0
 J = 68,47 kN/m

Out of validity range:
 Validity criteria: $a/t < 0.8$, $0.2 \leq a/c \leq 2$, $t/Ri < 0.25$



Megjegyzés:

A próbatest károsodása repedésnövekedéssel kezdődik, a repedésindulás 12,24 MPa nyomásnál történik. Az instabilitás 0,87 mm mélységirányú és 8,72 mm hosszirányú stabil repedésnövekedés után, 12,68 MPa nyomásnál következik be.

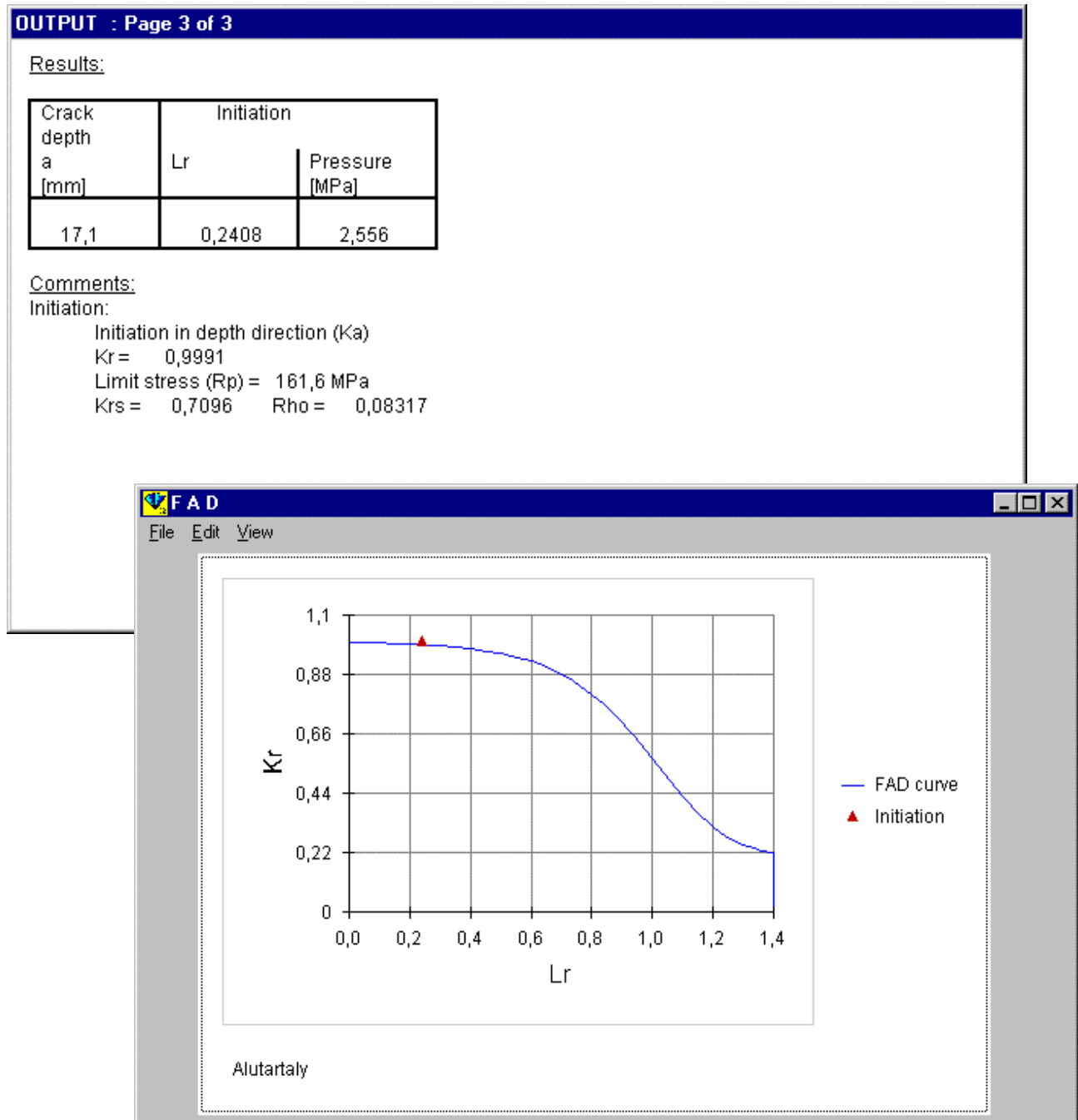
A törés kiindulási helye – vastagságirányban ('2a' irányban).

$a/c = \text{konstans}$.

(A repedésméret kívül esik az érvényességi tartományon.)

4. számítás: kritikus repedéshossz meghatározása- repedésindulás szempontjából

Az üzemi terheléshez tartozó kritikus repedéshossz számítása $a/c=0,2$ setén.



Megjegyzés:

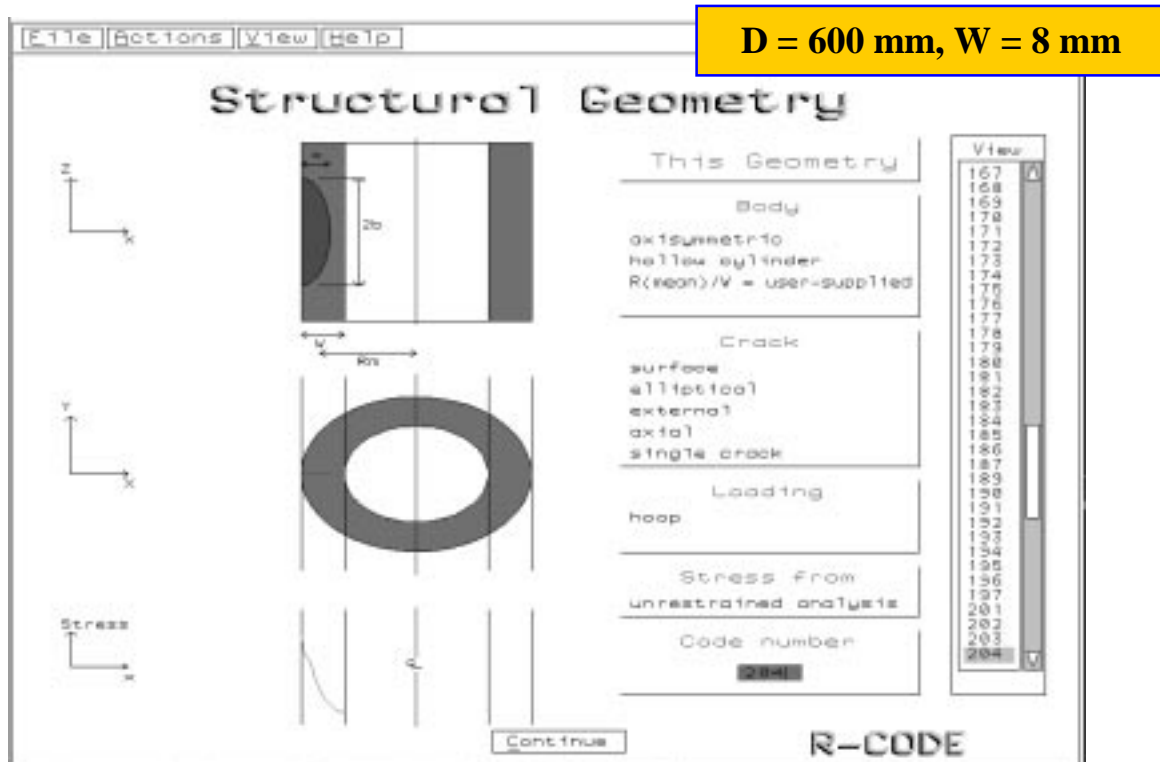
Az adott terhelés esetén a kritikus repedéshossz kb. 17 mm mélységirányban.
 A törés kiindulási helye – vastagságirányban ('2a' irányban).

5.3. *Belső nyomással terhelt egyenes csőszakasz - külső felületen axiális elliptikus repedéssel (Nuclear Electric R6 programmal)*



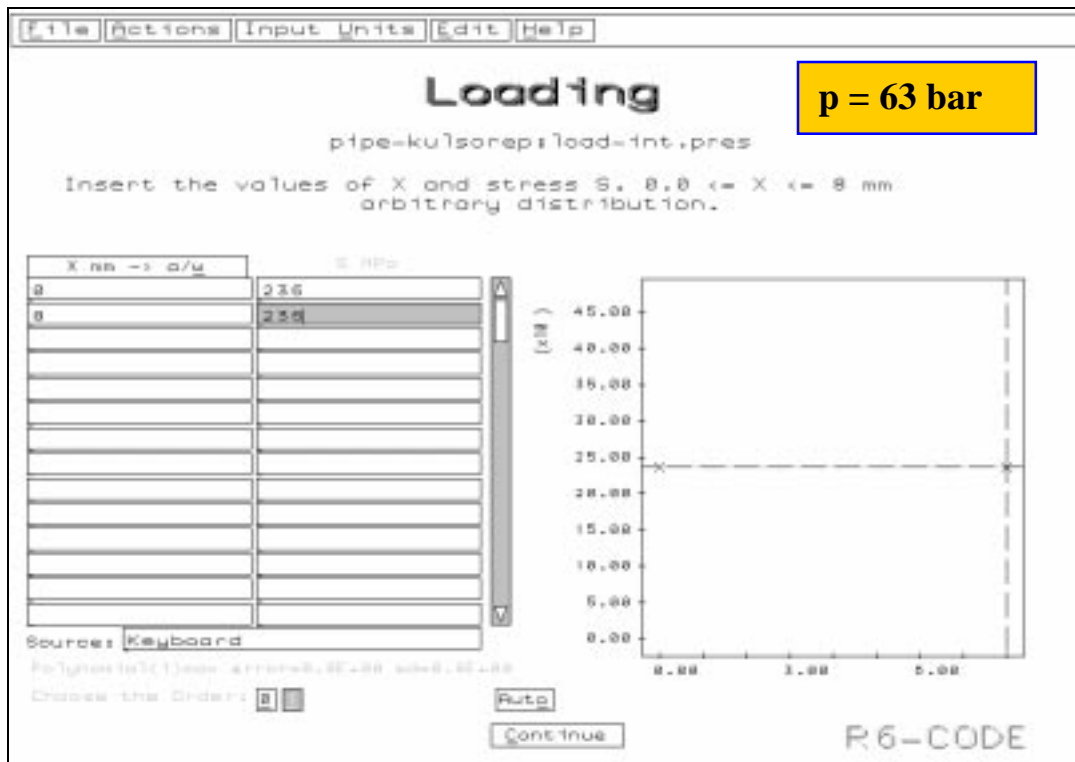
Szerkezet geometriája

- Külső átmérő: $D=60$ mm
- Falvastagság: $W=8$ mm
- Külső felületen axiális irányú, elliptikus repedés



Terhelési feltételek

- belső nyomásból ($p=63$ bar) származó, tangenciális feszültség



Anyagjellemzők

- Anyagminőség: X52
- $R_{eH} = 320$ MPa
- $R_m = 520$ MPa
- $E = 210000$ Mpa
- $K_{Ic} = 70$ MPa \sqrt{m}

File Actions Input Units Help

Material Properties

pipe-kulsorep:mats-steel

Give values for the following mechanical properties: _

| | | |
|---|--------|-----|
| Lower bound engineering 0.2% proof stress | 320 | MPa |
| Mean engineering 0.2% proof stress | 320 | MPa |
| Mean engineering ultimate strength | 520 | MPa |
| Young's modulus | 210000 | MPa |
| Poisson's ratio | 0.3 | |

$K_{Ic}=70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Continue R6-CODE

Probléma definiálása

File Actions Input Units Help

Problem Definition

pipe-kulsorepiprob-limit crack-global

Give values for the following defect dimensions. In limiting crack size analyses these values are used to determine the aspect ratio and start of search.

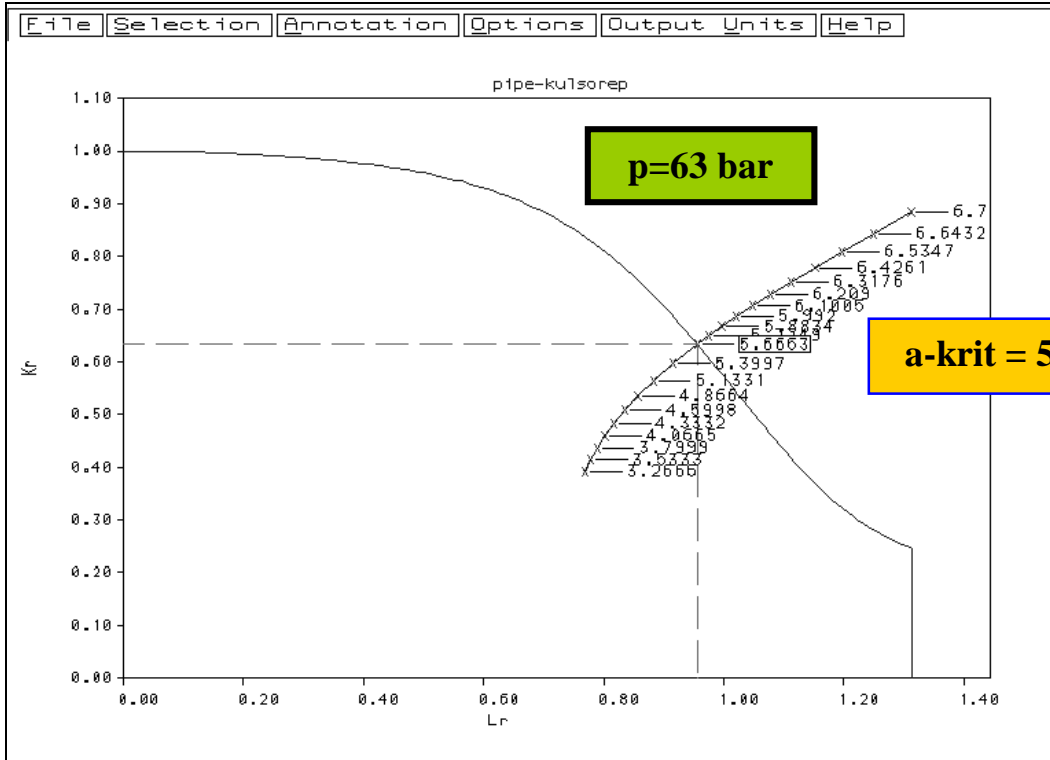
Repedésméreték:
a = 3 mm, b = 10 mm

| | | |
|-----------------|----|----|
| Semi-minor axis | 3 | mm |
| Semi-major axis | 10 | mm |

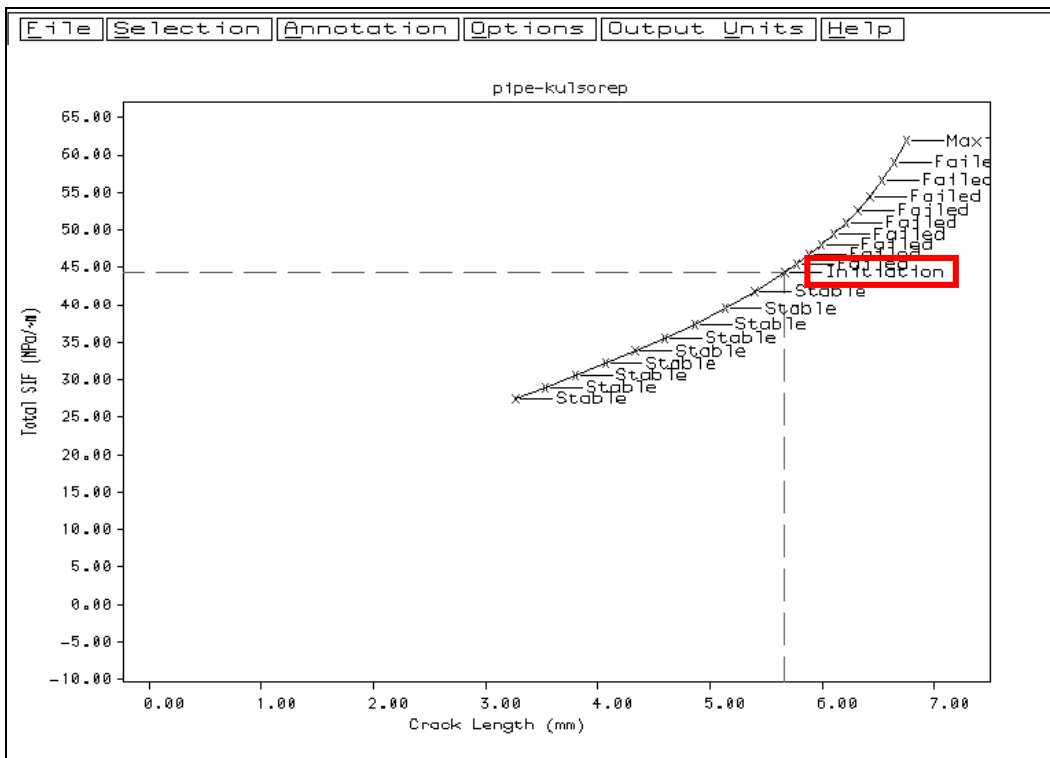
Continue R6-CODE

1. Kritikus repedésméret meghatározása

- 63 bar nyomás esetén mennyi a kritikus repedésméret?



K_I változása a repedéshosszal



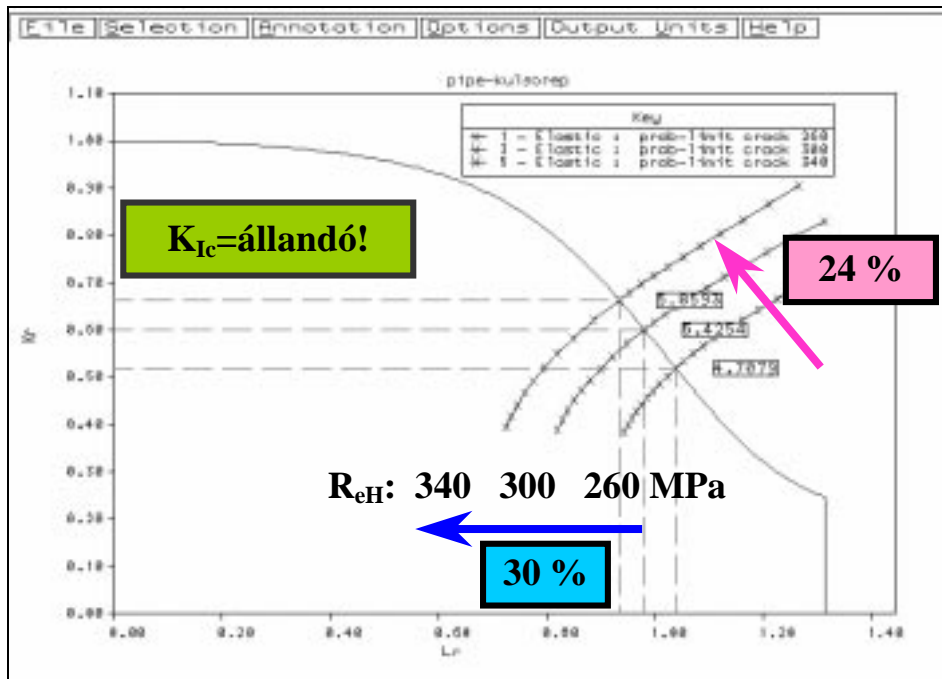
Paraméterek hatásának elemzése

- milyen hatása van a különböző anyagjellemző paramétereknek pl. a kritikus repedésméretre?



Folyáshatár változásának hatása a kritikus repedésméretre

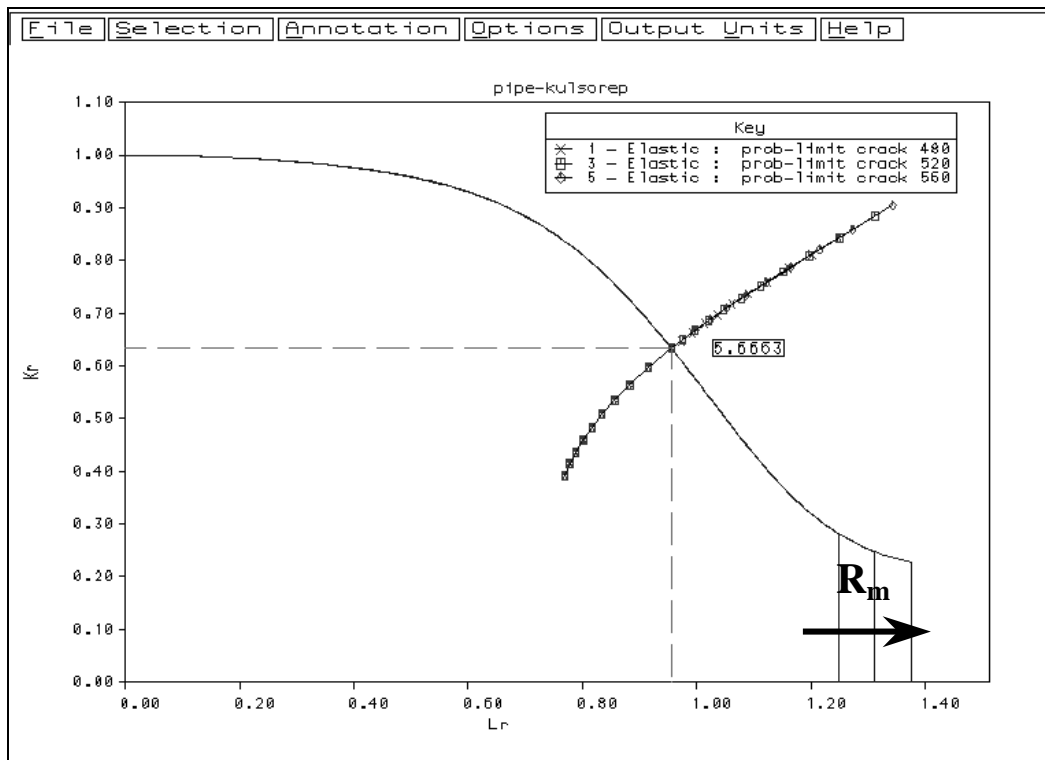
- hogyan változik a kritikus repedéshossz, ha az anyag folyáshatára 260-ról 340-re nő?



- A kritikus repedéshossz a folyáshatár 30 %-os növekedése esetén 24 %-kal nő (K_{Ic} =állandó feltételezést alkalmazva)

Szakítószilárdság hatása

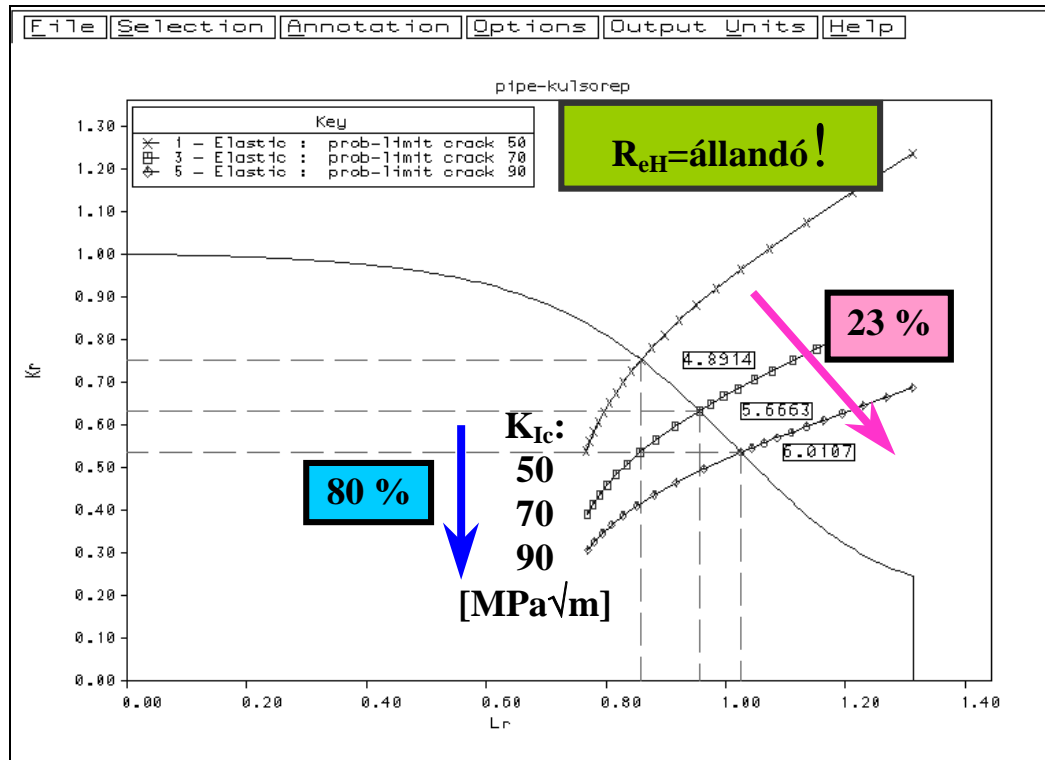
- Milyen hatása van, ha az anyag szakítószilárdsága 480 MPa-ról 560 MPa-ra nő (pl. anyagi jellemző szórásának figyelembe vétele)



- az R6 módszer elvéből következik, hogy a szakítószilárdság csak a képlékeny összeomlás határfeszültségét módosítja, így a határgörbe levágási értéke változik.

Törési szívósság hatása a kritikus repedésméretre

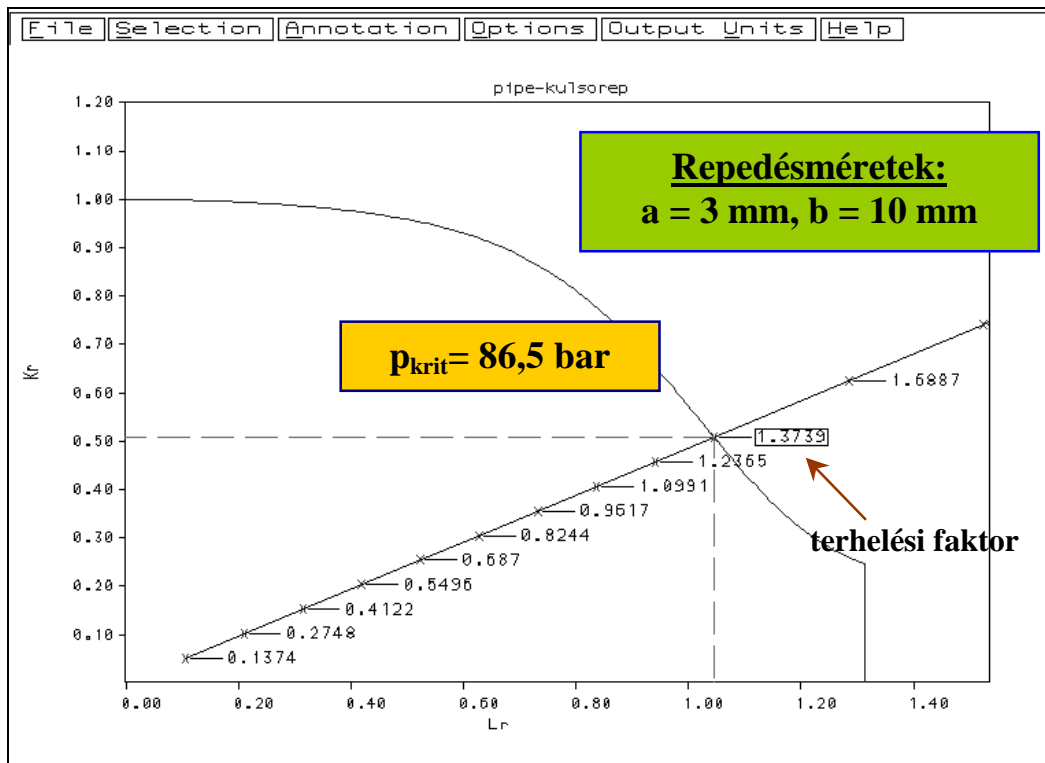
- Milyen hatása van, ha az anyag törési szívóssága $50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ -ről $90 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ -re nő (pl. anyagjellemző szórásának figyelembe vétele)?



- A kritikus repedéshossz a K_{Ic} 80 %-os növekedése esetén 23 %-kal nő ($R_{eH} = \text{állandó}$ feltételezést alkalmazva)

2. Határterhelés meghatározása

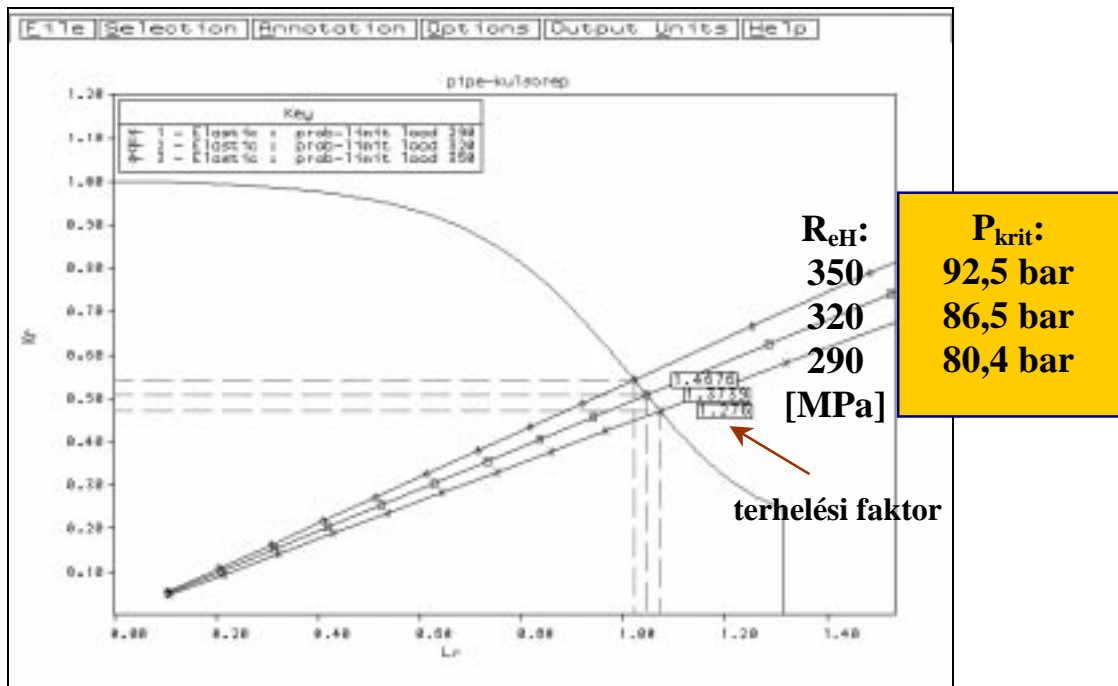
- a=3 mm és b=10 mm repedésméret esetén mennyi a kritikus nyomás értéke?



- a terhelési faktor jelentése, hogy az adott terhelés hányszorosa az üzemi terhelésnek
- a repedésinduláshoz tartozó kritikus nyomásérték 86,5 bar.

Folyáshatár változásának hatása a határterhelésre

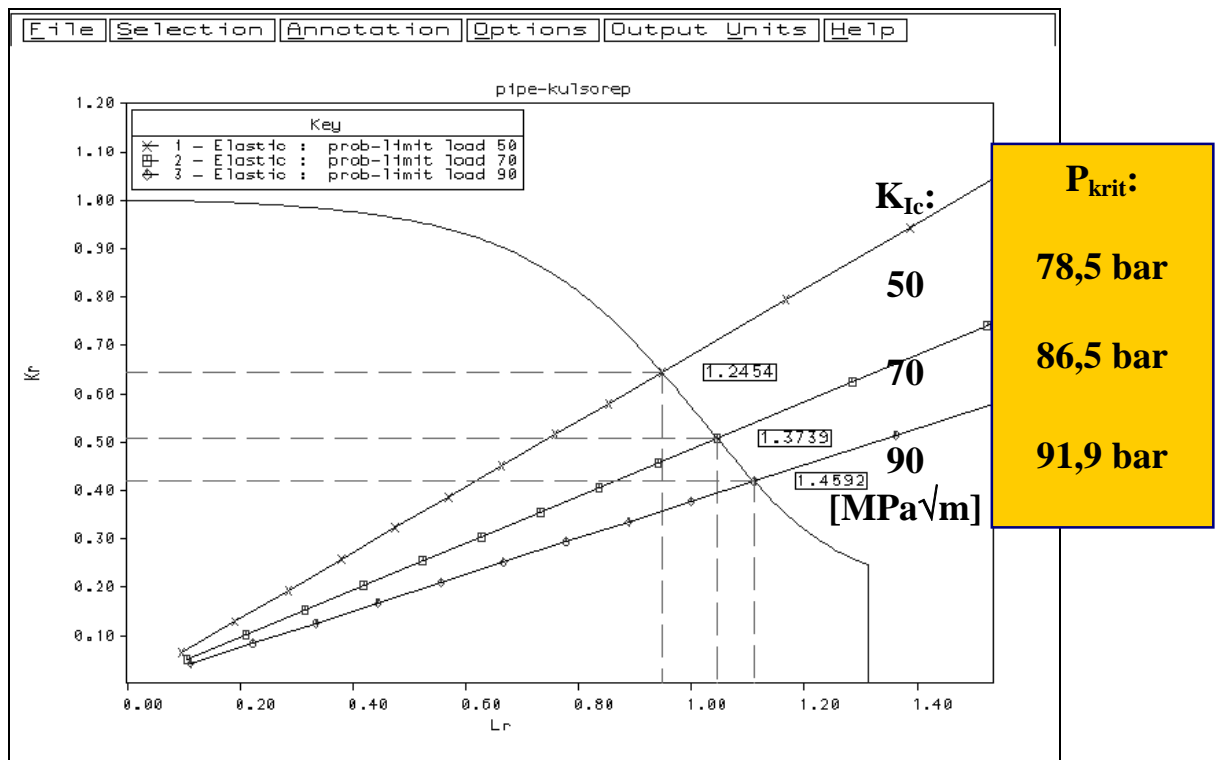
- hogyan változik a kritikus nyomás, ha az anyag folyáshatára 290-ről 350-re nő?



- a kritikus nyomásérték kb. 10 %-kal nő.

Törési szívósság hatása a határterhelésre

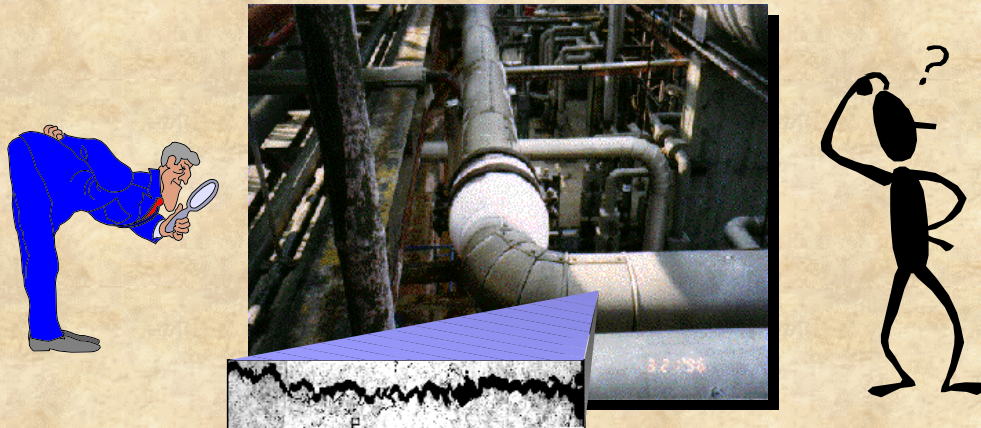
- Milyen hatása van, ha az anyag törési szívóssága $50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ -ről $90 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ -re nő?



- a kritikus nyomásérték kb. 17 %-kal nő.

- 1. sz. melléklet:
Előadás a szerkezetekben lévő hibák veszélyességének
értékeléséről**

Lenkeyné Biró Gyöngyvér:
Szerkezetekben lévő hibák
veszélyességének értékelése



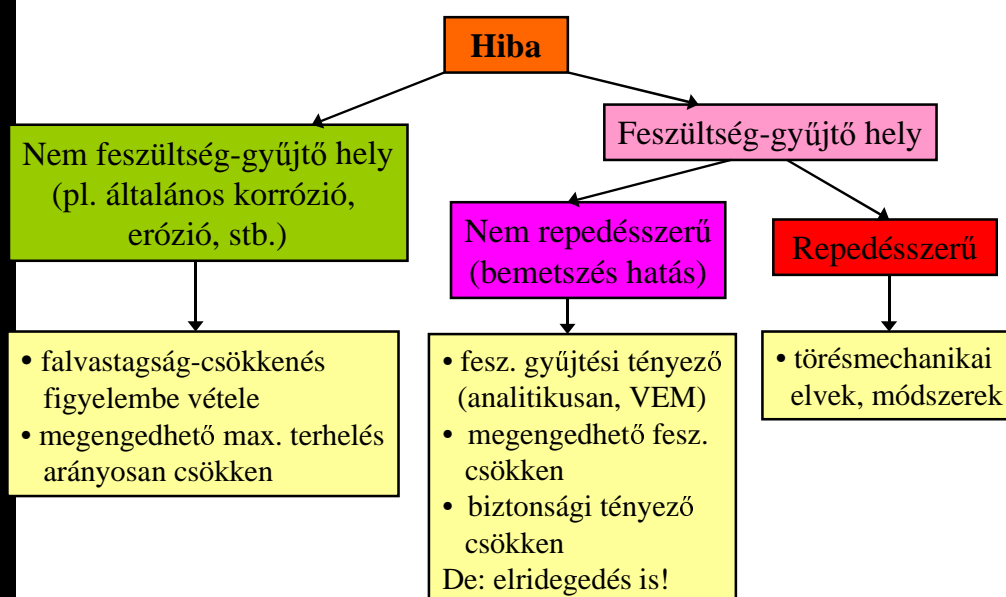
Vázlat

- ▶ „Fitness-for-service”, létező szabványok
- ▶ Terhelési feltételek, károsodási mechanizmusok
- ▶ Törési módok, törésmechanikai paraméterek
- ▶ Hibaértékelési módszerek:
 - egykritériumos módszerek (K_I , CTOD, J_I)
 - kétkritériumos módszerek
(hibaértékelő határdiagramok) - az R6 módszer

„Fitness-for-service” üzemelésre való alkalmasság

- hibával rendelkező szerkezet állapotának értékelése (a tervezett üzemelési élettartamra vagy a következő tervezett felülvizsgálatig)
- maximális megengedhető hibaméret meghatározása belső nyomással üzemelő berendezéseknél

Hibák veszélyességének értékelése



Létező szabványok, előírások

- ✓ ASME section XI
(Appendices A, C, G, H, K) → csövek és nyomástartó edények
- ✓ ASME Code Case N-494-3 → atomerőműi berendezések
- ✓ API 579 → vegyipari berendezések
- ✓ API 1104, CSA Z662 → csővezetékek
- ✓ PD6493, R6

Terhelési feltételek, károsodási mechanizmusok

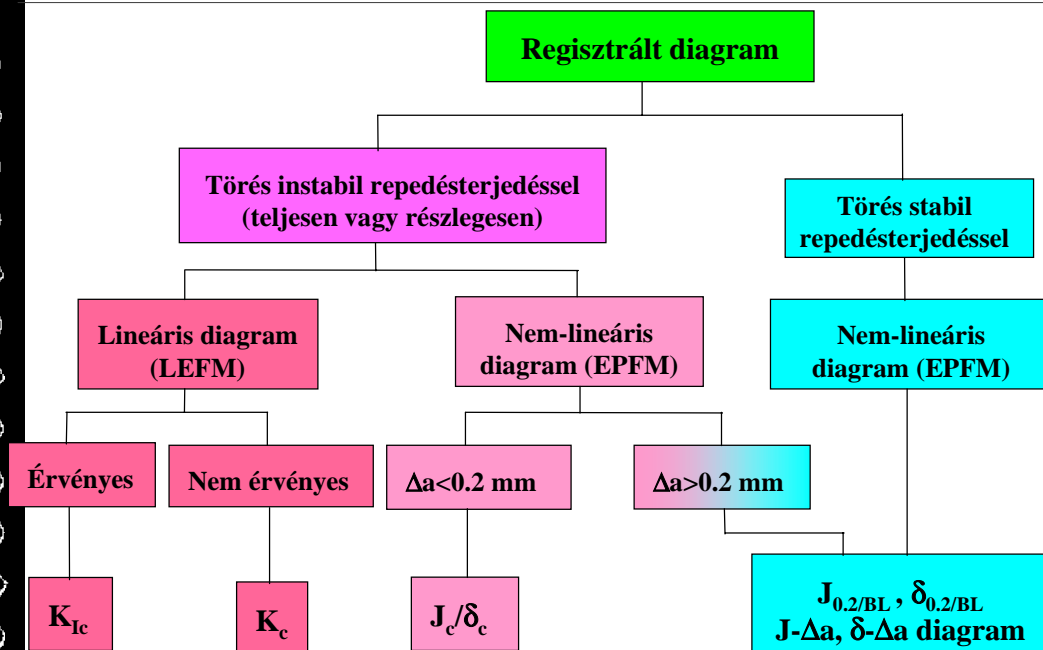
| Terhelés jellege | Statikus | Ismétlődő (fárasztó) |
|------------------|---|--|
| Hőmérséklet | | |
| Nem növelt | Törés: <ul style="list-style-type: none"> • Rideg • Szívós | <ul style="list-style-type: none"> • Fáradásos repedésterjedés • Nagy- és kisciklusú fáradás |
| Növelt | Kúszásos törés | Fáradás + kúszás kölcsönhatása |

Törési módok, törésmechanikai paraméterek

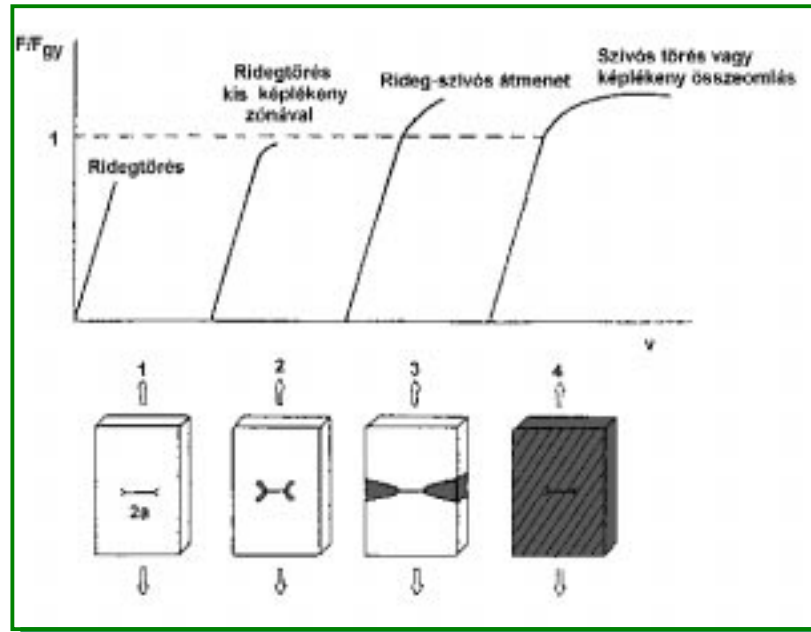
Fogalmak:

- ridegtörés - instabil repedésterjedés
- szívós törés - stabil repedésterjedés
- K_{Ic} - törési szívósság
- CTOD - kritikus repedésszétnyílás
- J_{Ic} - J-integrál kritikus értéke
- J-R görbe - stabil repedéserjedéssel szembeni ellenállás

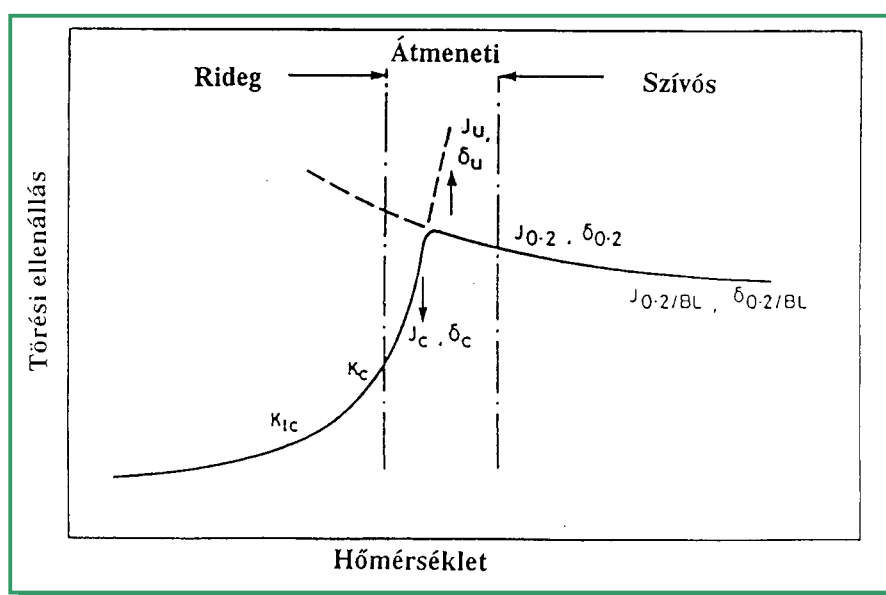
Törési módok, törésmechanikai paraméterek



Törési módok, törésmechanikai paraméterek



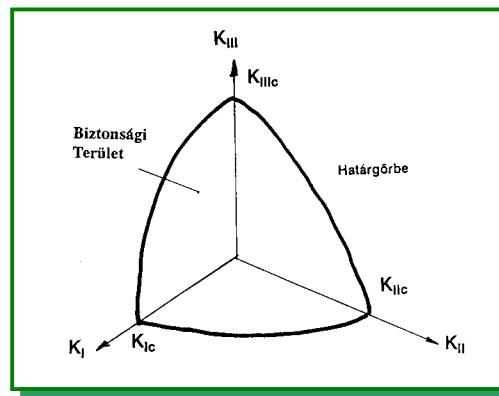
Hőmérséklet hatása a rideg-szívós viselkedésre



Hibaértékelés egykritériumos módszerekkel

✓ LEFM alapján (rugalmas eset):

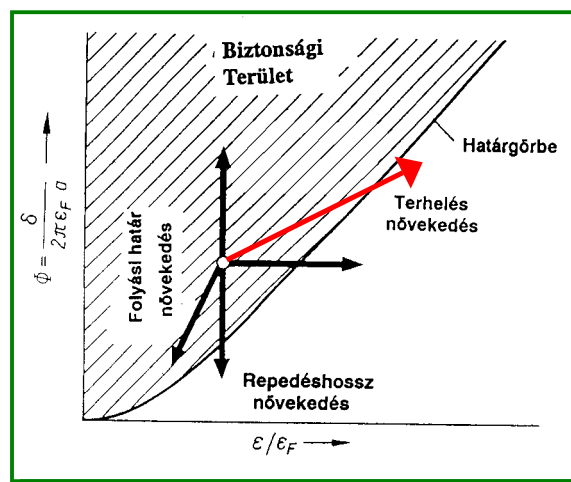
- K_I számítása minden fellépő terhelés komponens figyelembe vételével (pl. maradó feszültségek)
- $K_I \leq K_{Ianyag}(T)$?
- K_{II} , K_{III} figyelembe vétele



Hibaértékelés egykritériumos módszerekkel

✓ EPFM alapján (kismértékű képlékenység):

- $\delta \leq CTOD(T)$?
- Φ – törési paraméter

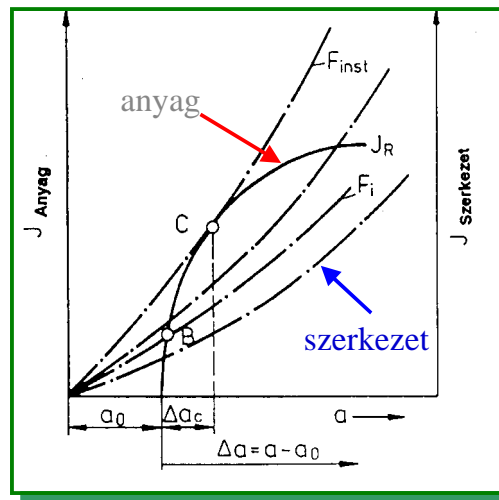


Hibaértékelés egykritériumos módszerekkel

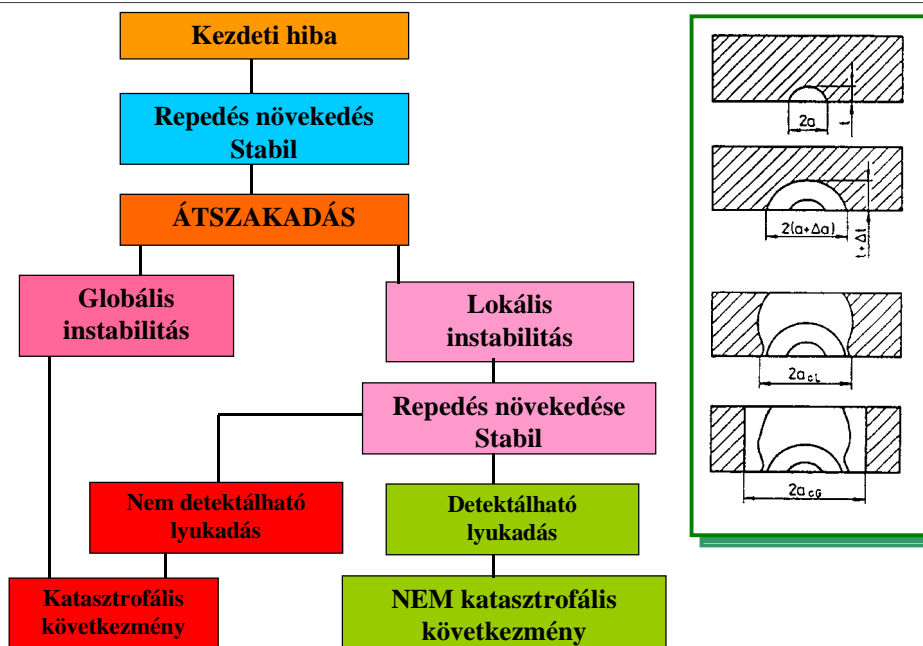
✓ EPFM alapján (nagy mértékű képlékenység):

- $J_I \leq J_{I\text{anyag}}(T)$?
- Stabilitás vizsgálat J-R görbe alapján:

$$\frac{dJ_{\text{anyag}}}{da} > \frac{dJ_{\text{szerkezet}}}{da}$$



Lyukadás-törés előtt koncepció



Hibaértékelés kétkritériumos módszerekkel

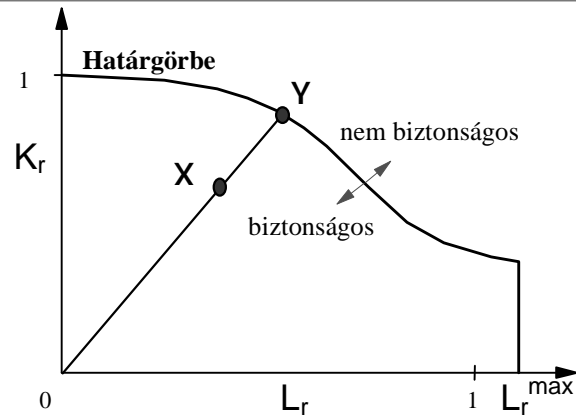
Hibaértékelő határdiagramon alapuló módszerek:

- 1975-ben Dowling és Townley publikációja
- 1976-ban R6 módszer kidolgozása (Harrison, Milne, Loosemore)
- Central Electricity Generating Board UK
- szabványokban (PD6492, R6, API, ASME Code Case, stb.)
- R6 módszer továbbfejlesztése:
 - * R2 – váltakozó terhelésű szerkezetek integritása,
 - * R3 – értékelő eljárás külső nyomás és ütközés hatására bekövetkező károsodás esetére,
 - * R4 – a nukleáris erőművek integritása szeizmikus terhelés esetén,
 - * R5 – növelt hőmérsékleten üzemelő szerkezetekben lévő hibák értékelése

Hibaértékelő határdiagramok elve

- ✓ potenciális károsodási mechanizmus két véglet közé esik:
 - tökéletesen rideg törés
 - képlékeny összeomlás (képlékeny instabilitás)
 - ✓ két paraméter:
 - ridegtörés bekövetkezésének veszélye: $K_r = \frac{K}{K_{\text{anyag}}}$
 - képlékeny összeomlás bekövetkezésének veszélye: $L_r = \frac{Q}{Q_L(\sigma_y)}$
- Q - terhelés (húzás, nyomás, hajlítás)
 $Q_L(\sigma_y)$ - terhelés határértéke

Az R6 hibaértékelő diagram

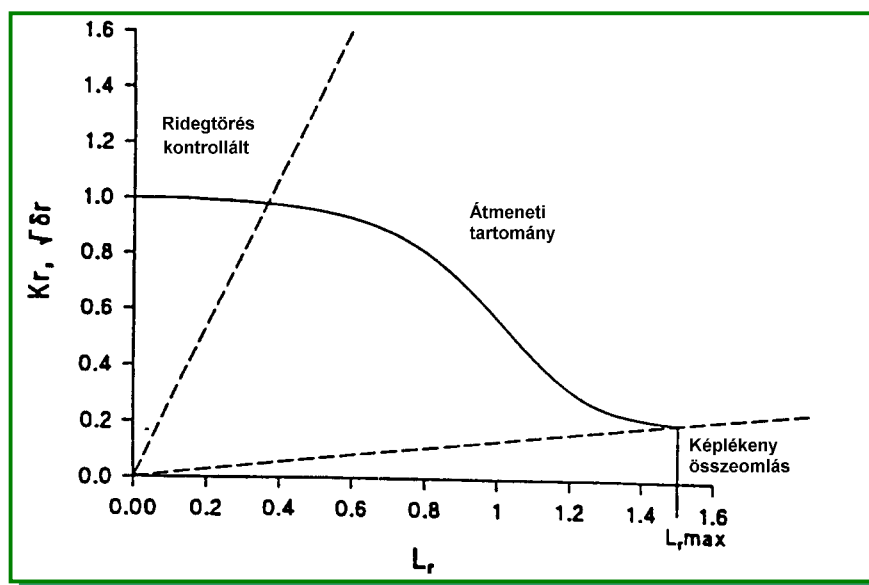


- X - üzemi terhelés
- Y - határterhelés

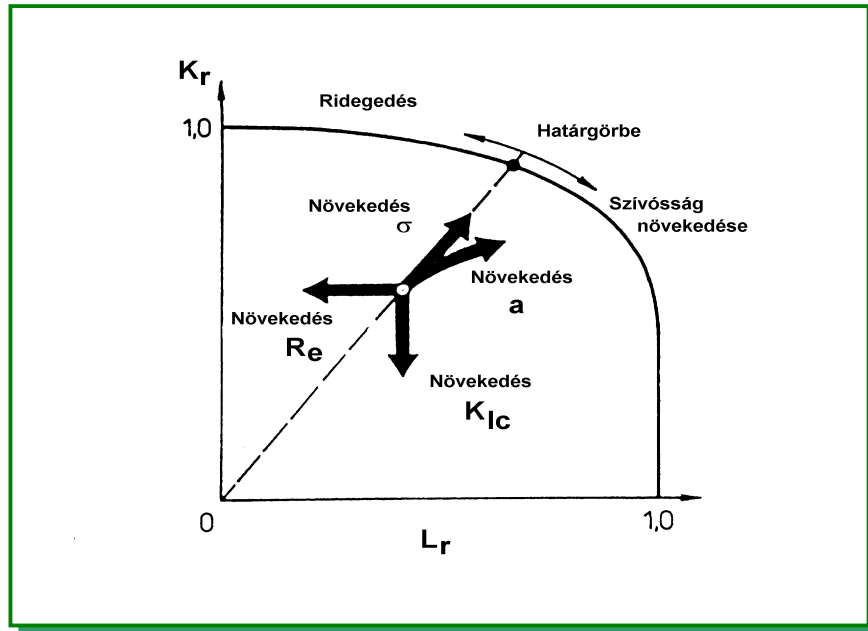
$$L_{r \max} = \frac{\sigma_{\text{flow}}}{\sigma_y} \quad - \text{alakítási keményedés figyelembe vétele}$$

- K_r kifejezhető K, J, CTOD alapján is
- biztonsági tényező

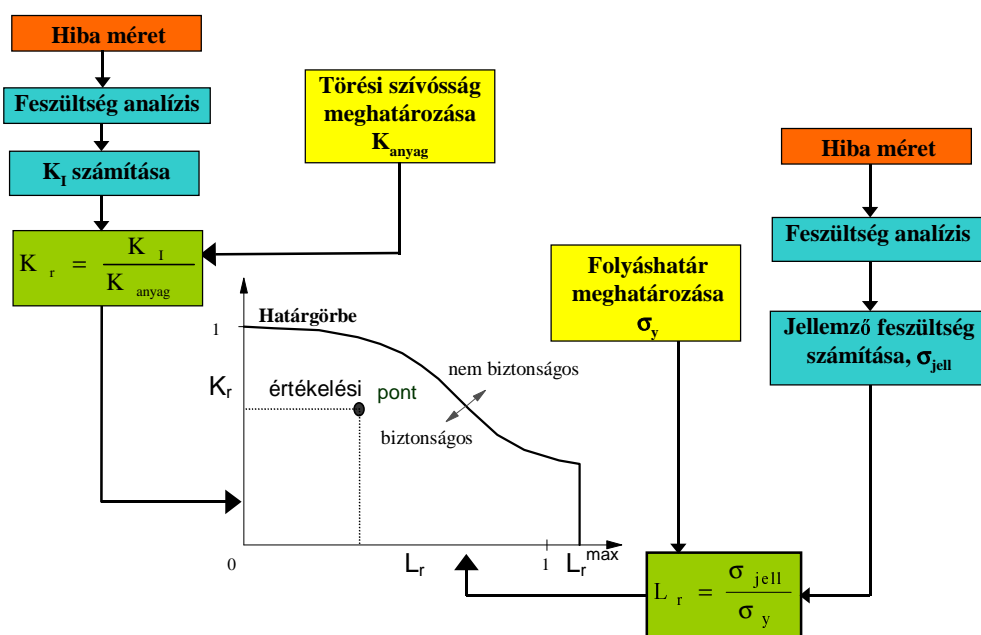
Törés jellegének megállapítása



Paraméterek hatása



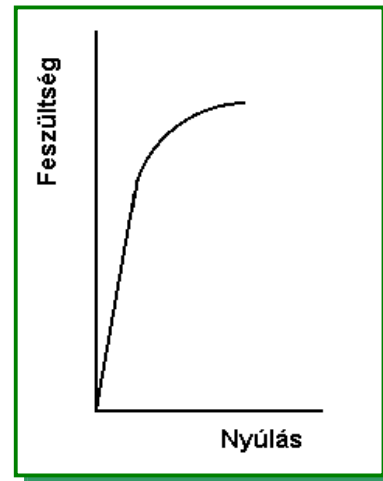
Üzemelésre való alkalmasság értékelése hibaértékelő diagram segítségével



R6 - 1. opció

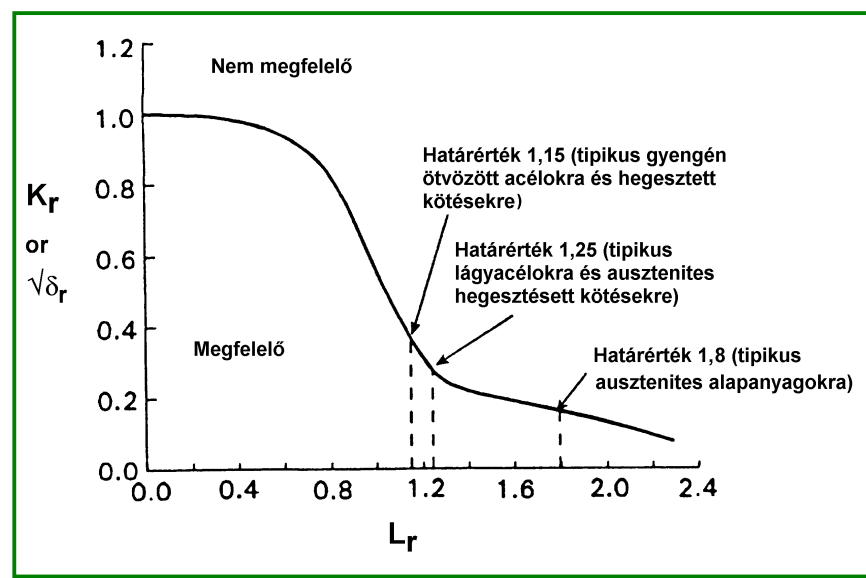
Alkalmazás:

- azokra az anyagokra, amelyeknek nagy az alakítási keményedése
- vagy az anyagegyenlet nem ismert
- nem alkalmazható olyan anyagokra, amelyek alsó folyáshatárral rendelkeznek.



R6 - 1. opció határ diagramja

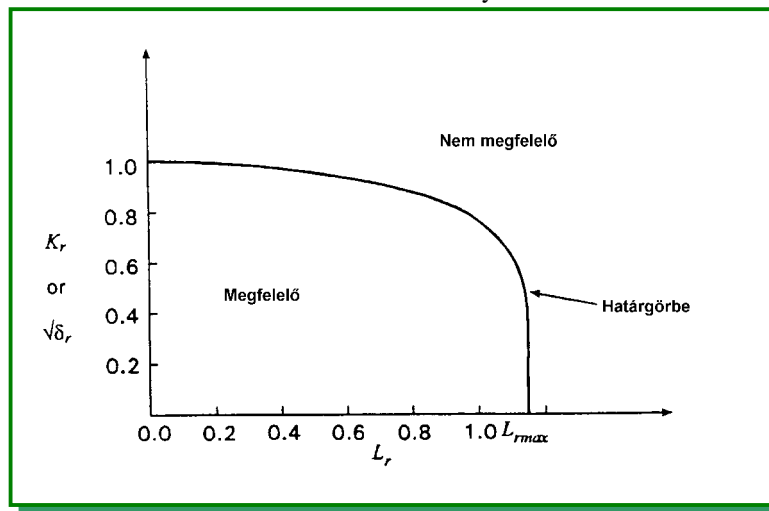
Általános diagram nagyobb alakítási keményedésű anyagokra:



R6 - 1. opció határdiagramja

Általános diagram kis alakítási keményedésű anyagokra:

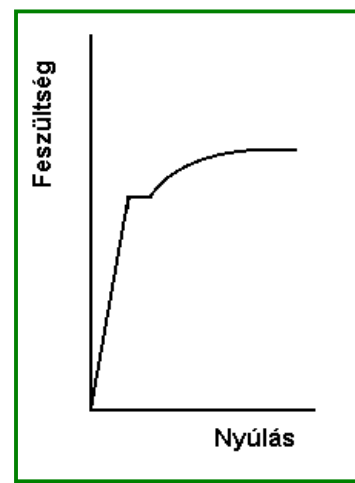
$$(\sigma_{\text{flow}} \leq 1,2 \sigma_y)$$



R6 - 2. opció

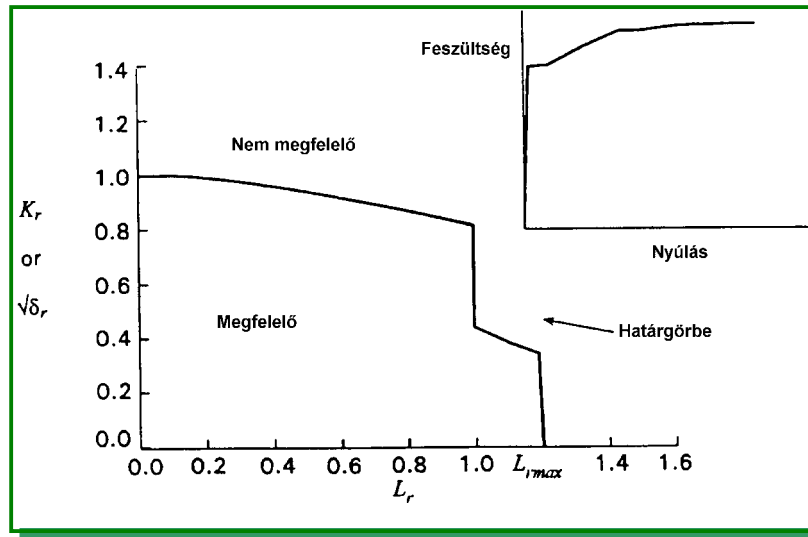
Alkalmazás:

- kismértékben keményedő anyagoknál
- vagy alsó folyáshatárral rendelkező anyagoknál
- és a valódi feszültség-alakváltozás görbe ismert.



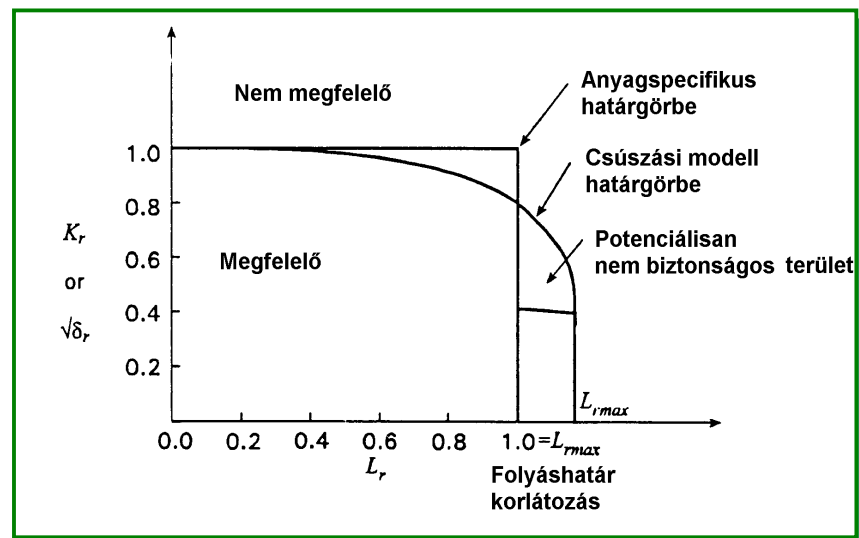
R6 - 2. opció határadiagramja

Anyag-specifikus határadiagram:



R6 - 2. opció határadiagramja

Alsó folyáshatárral rendelkező anyagokra:



R6 - 3. opció

J-integrált alkalmazza adott terhelés és geometria esetén

J-integrálból:

$$K_r = (J_{\text{rugalmas}} / J_{\text{anyag}})^{1/2}$$

Alkalmazás:

- ha a J-integrál-terhelés függvény ismert az adott geometriára

További lehetőségek

- ✓ szilárdság „mismatch” (eltérés) figyelembe vétele hegesztett kötéseknel:
 - ekvivalens feszültség-nyúlás görbe számítása σ_{yw} és σ_{yb} alapján
 - módosított R6 2. Opció határgörbe
- ✓ másodlagos feszültségek figyelembe vétele:
 - másodlagos feszültségek: maradó, termikus, stb.
 - K_r számításánál - additív
 - L_r -ben csak elsődleges feszültségek