



Anyagszerkezet és anyagvizsgálat – 2015/16

Törés

Dr. Krállics György
krallics@eik.bme.hu

Az előadás során megismerjük

- az állapotényező hatását;
- a törések alapvető fajtáit, mechanikai és fraktográfiai jellemzőit;
- a lineárisan rugalmas, illetve a képlékeny törésmechanika elméletét;
- a törésmechanikai tervezés koncepcióját.

2

Bevezetés



Törés: az anyagban folytonossági hiány jön létre, amitől darabokra eshet szét.

Törés folyamata:

- Repedés keletkezése;
- Repedés terjedése és a törés létrejötte.

Képlékeny (szívós) törés: a törést megelőzően jelentős mértékű képlékeny alakváltozás lép fel.

Ridegtörés: hirtelen bekövetkező jelenség, minimális képlékeny alakváltozás előzi meg. A kis hőmérséklet, a bonyolult, húzó feszültségi állapot és a nagy terhelési sebesség elősegíti a ridegtörés fellépését.

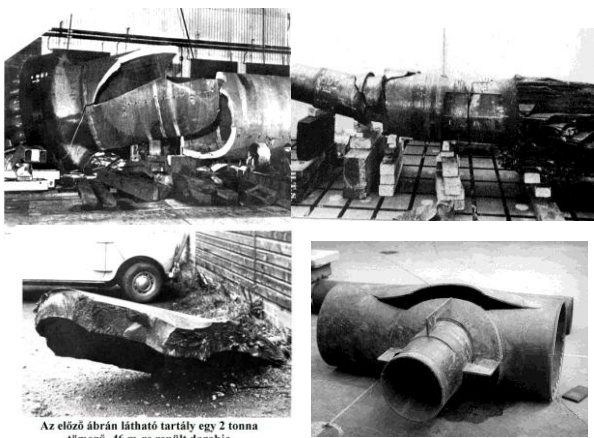
Repedés mindig van az anyagban, legfeljebb nem tudjuk kimutatni.

3

Káresetek

- 2700 db Liberty típusú hegesztett hajó gyártása a második világháború során. 400 db-on törés jelentkezett, amelyből 90 komolynak számított. 10 hajó kettétörött.
- A hegesztett kötések rossz minőségű (félig-csillapított) acélból készültek, repedésszerű hibákat tartalmaztak (anyaghiba).
- A törések feszültséggyűjtő helyekből indultak ki (konstrukciós hiba).
- Az acélok szívóssága kicsi volt, az utólagos Charpy vizsgálat ezt mutatta.

4



Az előző ábrán látható tartály egy 2 tonna tömegű, 46 m-re repült darabja

5

Repedés keletkezése az üzemelés során

- Időleges túlterhelés, illetve környezeti tényezők hatása
- Korróziós fáradás
- Feszültségkorrózió
- Hidrogén okozta elridegedés
- Hőmérséklet és mechanikai terhelés együttes hatása, kúszási repedés
- Hő sokk okozta repedés.

Repedések kimutatása:

roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerekkel.

6

Repedés keletkezése a gyártás során

Öntészet: pórusok, lunkerek, zárványok, melegrepedések keletkezhetnek a technológiai paraméterektől függően.

Melegalakítás: az alakváltozási képesség csökken, pl. szemcsehatármenti kiválásoknál.

Auszténit szemcsehatár károsodása anizotrop szerkezet következtében.

Hidegalakítás: az alakváltozó képesség kimerülése miatt.

Hidrogén hatására bekövetkező repedés, pelyhesedés.

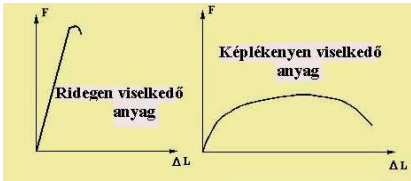
Hőkezelés: edzési repedés.

Hegesztés: meleg- és hidegrepedés, relaxációs repedés.

Forgácsolás: életlen szerszám vagy túl nagy terhelés esetén.

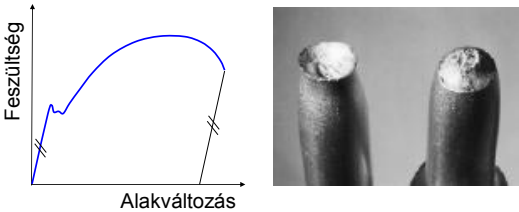
7

A szerkezeti anyagaink tönkremenetelének két szélsőséges típusa a ridegtörés illetve a szívós (képlékeny) törés. A rideg illetve képlékeny viselkedést az adott anyagon végzett szakítóvizsgálat is jól szemlélteti



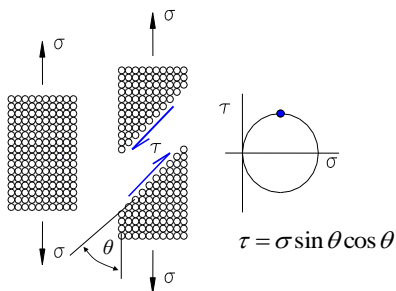
Szívós törés I.

Jelentős mértékű képlékeny alakváltozás a törés előtt.



9

Szívós törés mechanikai sémája szakításnál

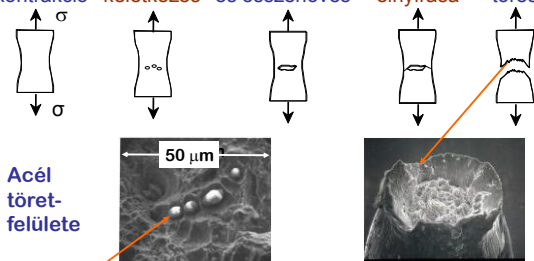


10

Szívós törés II.

Károsodás:

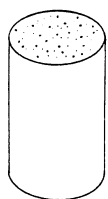
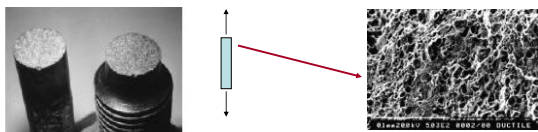
kontrakció üreg keletkezés üreg növekedés és összenövés felület elnyírása törés



Második fázisú részecskék, elősegítik üregek keletkezését.

11

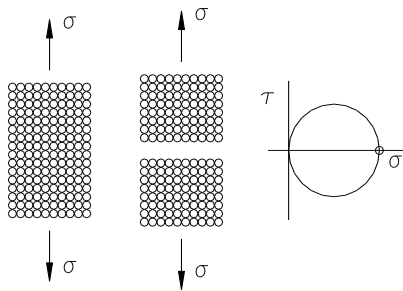
Ridegtörés



- A töretfelület merőleges a húzás tengelyére.
- Kontrakció nem lép fel az alakítás során.
- Nincs makroszkopikus képlékeny alakváltozás.
- A töretfelület átmetszi a szemcséket.

12

A ridegtörés mechanikai sémája
szakításnál



13

Állapottényezők

Az anyag szívós (képlékeny) vagy rideg viselkedése az anyagnak nem tulajdonsága, hanem állapota, és annak szerkezetén kívül az állapottényezők befolyásolják.

Feszültségi állapot

A többtengelyű húzófeszültségek a rideg állapot felé, a többtengelyű nyomófeszültségek a képlékeny állapot felé viszik el az anyag viselkedését.

Hőmérséklet

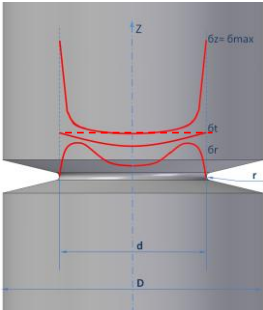
Növekvő hőmérséklet hatására az anyag képlékenyebben, csökkenő hőmérséklet esetén ridegebben viselkedik.

Igénybevétel sebessége

Növekvő sebesség hatására az anyag ridegebben, csökkenő sebesség esetén képlékenyebben viselkedik.

14

Feszültségi állapot hatása



Rugalmas megoldás

Névtelen feszültség

$$\sigma_n = \frac{F}{A}$$

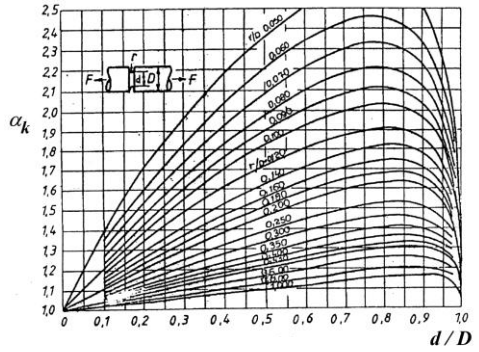
Maximális feszültség

$$\sigma_{max} = \sigma_n \cdot \alpha_k$$

$\alpha_k(K_t)$ – formatényező

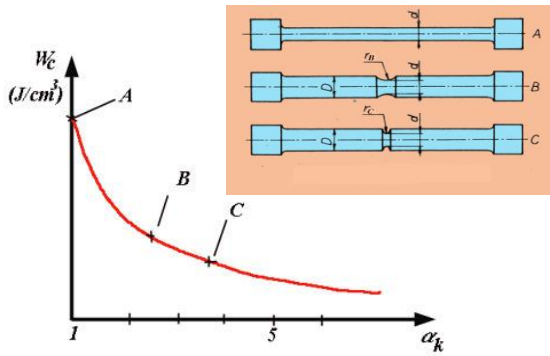
$$\alpha_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n}$$

Diagram α_k meghatározására



16

A feszültségi állapot ridegítő hatása



$\bar{\epsilon}_t$ – törési alakváltozás
T=áll. $\dot{\epsilon}$ = áll.

Határgörbe

zömítés

csavarás

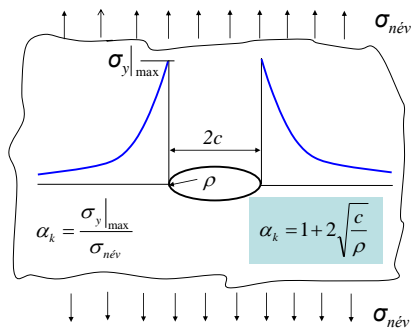
szakítás

$$k = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \sigma_{eq}$$

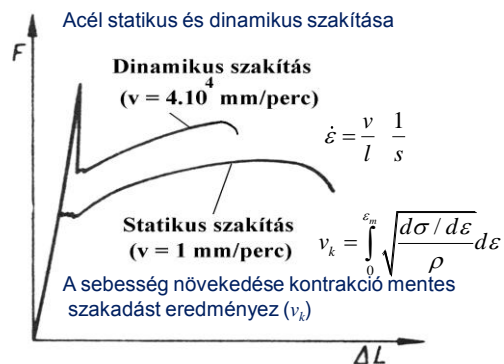
18

Bemetszés feszültségkoncentrációs hatása

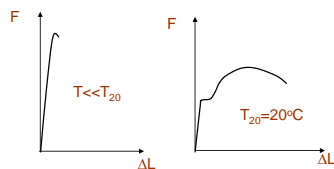


19

Az alakváltozási sebesség hatása



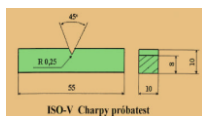
A hőmérséklet hatása



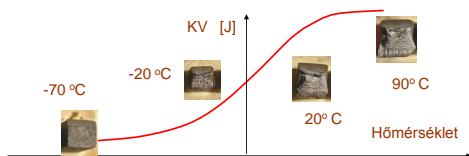
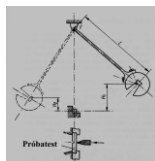
A hőmérséklet növekedésével az anyag alakváltozó képessége növekszik, a szilárdsági mérőszámok csökkennek.

A hőmérséklet csökkenésével az alakváltozó képesség csökken és egy adott hőmérsékleten teljesen kimerül. Ekkor a fajlagos törési munka zérus lesz. Ezzel párhuzamosan a szilárdsági mérőszámok nőnek.

A hőmérséklet és a bemetszés érzékenység együttes vizsgálata



Charpy-féle ütvehajlító vizsgálat

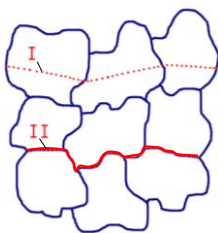


Töretfelületek vizsgálata

Ridegtörés: a törési energia új felületek képződésére fordítódik, a törés pedig:

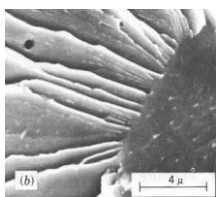
- I. Transzkrisztallin, vagy
- II. Interkrisztallin lehet.

Szívós törés: a törési energia képlékeny alakváltozásra és új felületek képződésére fordítódik. Üregek keletkezése, növekedése és összenövése a jellemző.



23

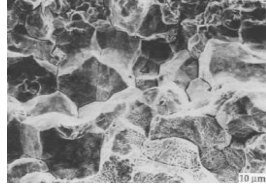
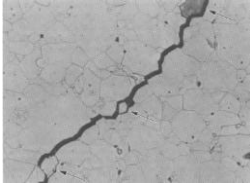
Transzkrisztallin (hasadásos) törés



A repedés a szemcséken keresztül, meghatározott atomsíkokon terjed.

24

Interkrisztallin törés

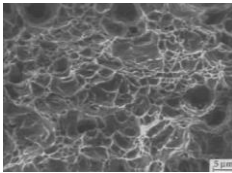


A törés a szemcsék között, a szemcsehatárokon történik.

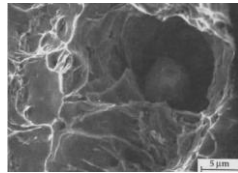
25

Szívós törés

A törtetfelület gödrös, tompa fényű. A törést a csúsztatófeszültségek hatására bekövetkező elnyíródás okozza.



Üreges összenövés

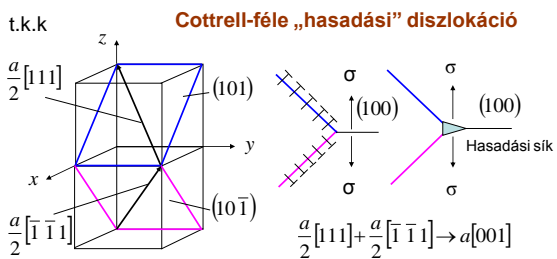


Üreges képződése
második fázis körül

26

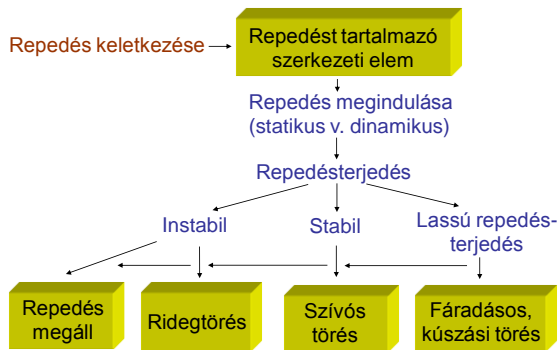
Ridegtörés diszlokációs értelmezése

Repedés keletkezésének feltétele: képlékeny alakváltozás.
Képlékeny alakváltozáskor megnő a diszlokációsűrűség,
ami üregeket, repedéseket eredményez.



27

Repedés folyamata



28

Repedésterjedés fajtái

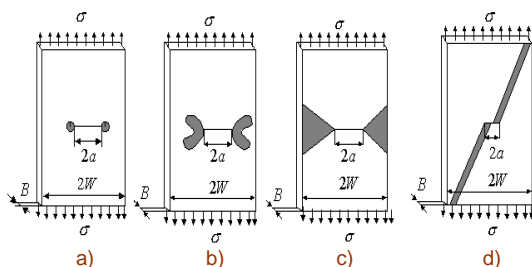
Stabil repedésterjedés: állandó energiát fogyaszt, a repedés csúcsa előtt üregek keletkeznek, majd egyesülnek.

Instabil repedésterjedés: állandó energiaszabályozás közben megy végbe nagy sebességgel, így makroszkopikusan ridegtörést okoz.

Fokozatos repedésterjedés: a stabil repedésterjedés hosszabb időtartamra kiterjedő változata, jellemző a *fáradásos törés*, a *kúszás* és a *feszültségkorrózió* okozta törés esetében.

29

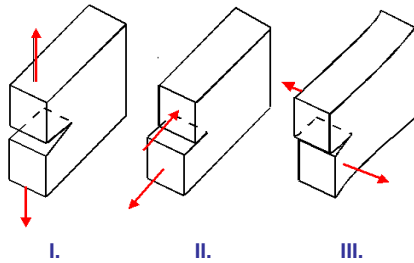
Törésmechanikai elméletek



- a) Lineáris rugalmas alakváltozás
- b) Kis területre korlátozódó képlékeny alakváltozás
- c) Rugalmas-képlékeny alakváltozás
- d) Képlékeny alakváltozás az egész testben

30

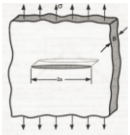
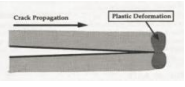
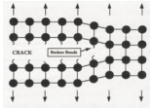
Terhelési módok



31

A törés energetikai modellje

- 1.) $\sigma_{krit} = \sqrt{\frac{2E\gamma_k}{\pi a}}$, E – rugalmassági modulusz, γ_k – fajlagos rugalmas felületi energia
 l – repedés hossz
- 2.) $\sigma_{krit} = \sqrt{\frac{2E\gamma_k}{\pi a(1-\nu^2)}}$, ν – Poisson tényező, Griffith elmélet
- 3.) $\sigma_{krit} = \sqrt{\frac{2E\gamma_p(1+\gamma_k/\gamma_p)}{\pi a}}$, γ_p – fajlagos képlékeny felületi energia
 $\gamma_k \ll \gamma_p$, Orowan elmélet
- 4.) $\sigma_{krit} = \sqrt{\frac{2E\gamma_p}{\pi a}}$
- $w_f = \gamma_k + \gamma_p$
Törési energia



1. Rugalmas test, sík feszültségi állapot, 2. Rugalmas test sík alakváltozási állapot, 3.- 4. Rugalmas-képlékeny test sík feszültségi állapot

32

Feszültségintenzitási elmélet

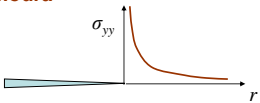
Egy általános alakú test belsejében lévő repedés csúcsánál kialakuló feszültségmező

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} (K_I f_{ij}^I + K_{II} f_{ij}^{II} + K_{III} f_{ij}^{III})$$

ahol K_I, K_{II}, K_{III} – feszültségintenzitási tényezők a különböző terhelési módoknál,

$f_{ij}^I, f_{ij}^{II}, f_{ij}^{III}$ – dimenzió nélküli függvények.

I. terhelési módra



$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$

33

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2} \theta \right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2} \theta \right)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2} \theta$$

Síkbeli feszültségi állapotban $\sigma_z = 0$,

Síkbeli alakváltozási állapotban $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$

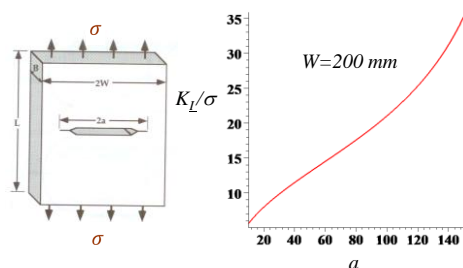
Instabil repedésterjedéskor $K_I = K_{Ic}$. Ha ez a repedésterjedés síkbeli alakváltozási állapotban lép fel, akkor $K_I = K_{Ic}$, amely anyagjellemző (törési szívósság).

34

Feszültségintenzitási tényező

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\sec \frac{\pi a}{2W} \left(1 - 0.025 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 0.06 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right)}$$

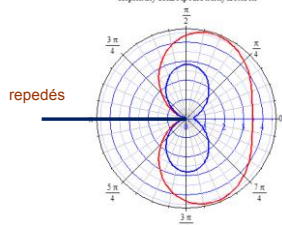
$$W \rightarrow \infty, K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$$



35

Képlékeny zóna meghatározása

Képlékeny zóna repedés környékén



$$\sigma_1 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_2 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_3 = 0, \text{ sík feszültség}$$

$$\sigma_3 = \nu(\sigma_1 + \sigma_2), \text{ sík alakváltozás}$$

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} = R_e$$

$$r_p(\theta) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2 \left[1 + \cos \theta + \frac{3}{2} \sin^2 \theta \right] - \text{sík feszültségi állapot}$$

$$r_p(\theta) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2 \left[(1 - 2\nu)^2 (1 + \cos \theta) + \frac{3}{2} \sin^2 \theta \right] - \text{sík alakváltozási állapot}$$

36

Kis képlékeny tartományú LRTM

A képlékeny zóna síkbeli feszültségállapot esetén:

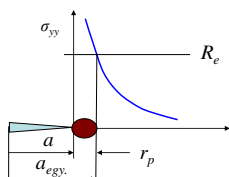
$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2$$

Síkbeli alakváltozási állapot esetén:

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2$$

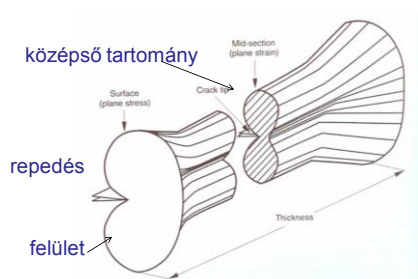
A módosított repedéshosszal számolva a rugalmas anyagra vonatkozó törési elmélet alkalmazható:

$$a_{\text{egyenértékű}} = a + r_p$$



37

Képlékeny zóna változása a próbatest vastagsága mentén



38

Feszültségintenzitási tényező korrekciója

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a}, \quad r_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2$$

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi(a + r_p)},$$

$$K_I^2 = Y^2\sigma^2\pi \left(a + \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2 \right) \rightarrow$$

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{Y^2}{6} \left(\frac{\sigma}{R_e} \right)^2}}$$

39

Törésmechanikai méretezés

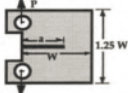
Az adott szerkezetben repedés lehetséges ! Azt kell megakadályozni, hogy a repedés instabilan terjedjen.

$K_I \leq K_{Ic}$

Szerkezettől és terheléstől függ Anyagjellemző
Repedéssel rendelkező szerkezet vizsgálata Törésmechanikai anyagvizsgálat

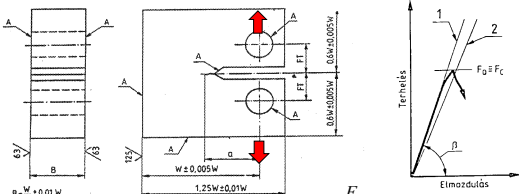


$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi a} \leq K_{Ic}$ $f(a) = Y(a) \sigma \sqrt{\pi a} - K_{Ic}$
 $\sigma_{max} \leq \frac{K_{Ic}}{Y \sqrt{\pi a}}$ $a_{krit} = solve(f, a)$



40

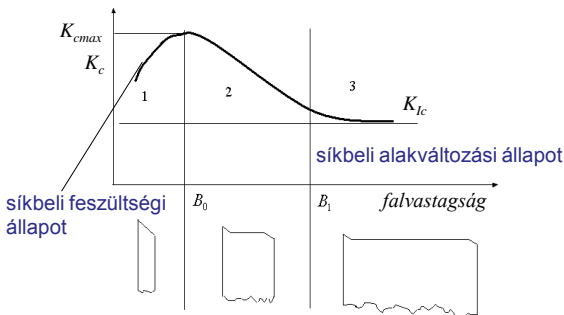
Törési szívósság meghatározás



$K_Q = \frac{F_Q}{BW^{0.5}} Y(a/W)$
 $Y = 29.61 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} - 185.5 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}} + 65.5 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{5}{2}} - 1017 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{7}{2}} + 638.9 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{9}{2}}$
 $ha \ a, (W-a), B \geq \gamma \left(\frac{K_Q}{R_{p0.2}}\right)^2 \rightarrow K_Q = K_{Ic} \quad \gamma_{acél} = 2.5, \gamma_{aluminium} = 4$

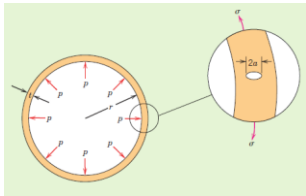
41

A K_{Ic} változása a falvastagság függvényében



42

Törésmechanikai ellenőrzés



Adott geometriájú és terhelésű tartály falában roncsolás mentes vizsgálattal megállapították hogy 2ax2b méretű elliptikus repedés van. A mértékadó feszültség:

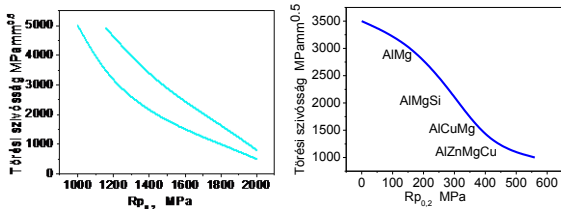
σ = pr / 2t

Szilárdsági számítással meghatározható a repedés csúcsánál a feszültség intenzitási tényező.

K_I = Yσ√πa ≤ K_Ic → a szerkezet működőképés

43

Különböző anyagok törési szívósság értékei

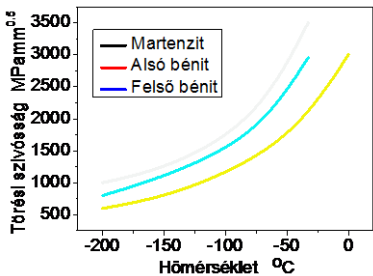


Ötvöztött nemesíthető acélok

Ötvöztött acélok

44

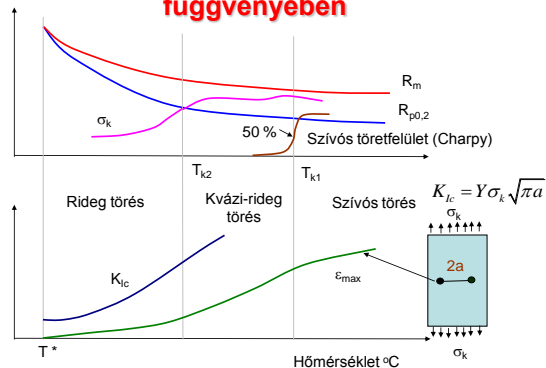
Törési szívósság különböző szövetszerkezet esetén



NiCrMoV ötvöztetésű nemesíthető acél

45

Törési típusok változása a hőmérséklet függvényében



Fogalmak

- Törés fogalma
- Ridegtörés
- Szívóstörés
- Repedések a gyártás során
- Repedések a szerkezet üzemelése során
- Állapottényezők
- Ridegtörési felületek mikroszkópi jellemzői
- Szívóstörési felületek mikroszkópi jellemzői
- Ridegtörés diszlokációs elmélete
- Stabil repedésterjedés
- Instabil repedésterjedés
- Fokozatos repedésterjedés
- Terhelési esetek
- Feszültség intenzitási elmélet
- A K_{Ic} falvastagság függése
- Törési szívósság
- Képlékeny zóna
- Törésmechanikai méretezés alapegyenlete
- Kritikus hőmérsékletek

47

A tananyag részletesen megtalálható

William D. Callister, Jr.
Materials Science and Engineering
An Introduction, 7th edition, 2006

Chapter 8 Failure
207-226 pp.

48