

Az ismételt igénybevétel hatása

A kifáradás jelensége

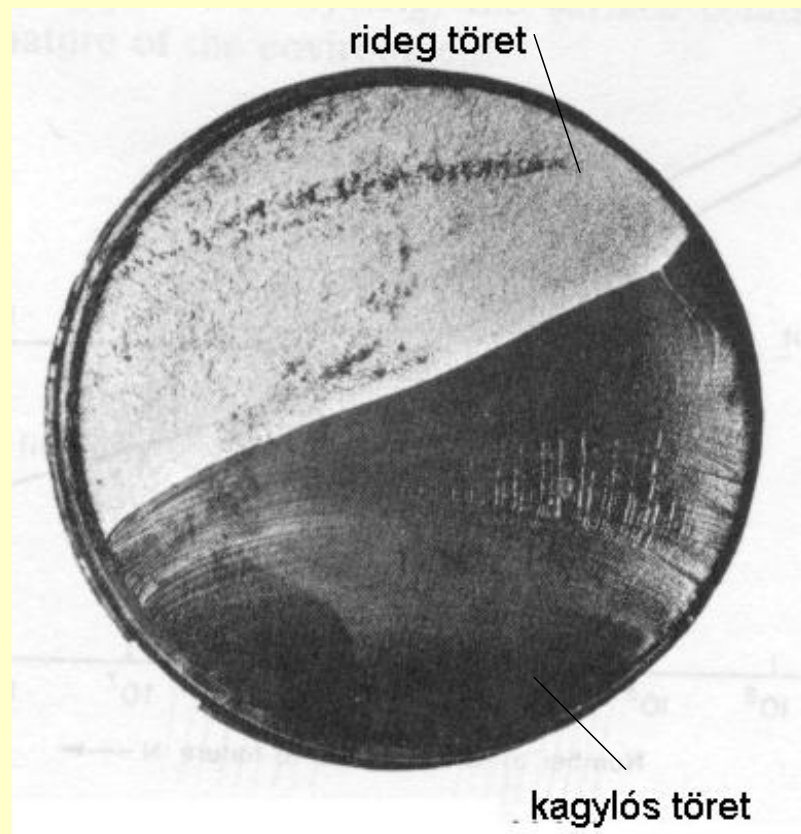
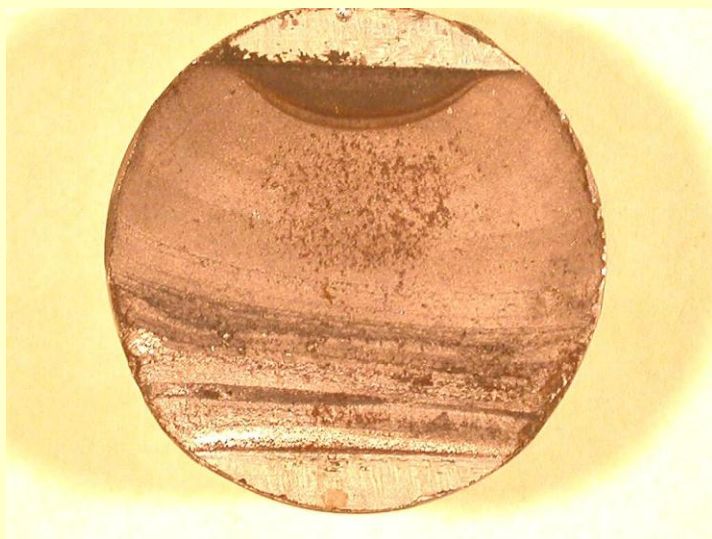
A kifáradás jelensége

Azt a jelenséget, amikor egy anyag az ismételt igénybevételek során bevitt, halmozódó károsodások hatására a folyáshatárnál kisebb terhelés esetén eltörik **kifáradásnak** nevezzük.

Az anyag kifáradása **törésként jelentkezik**, de a kifáradás **folyamata** legszorosabban a **képlékeny alakváltozással** kapcsolatos.

A fáradt töret jellege

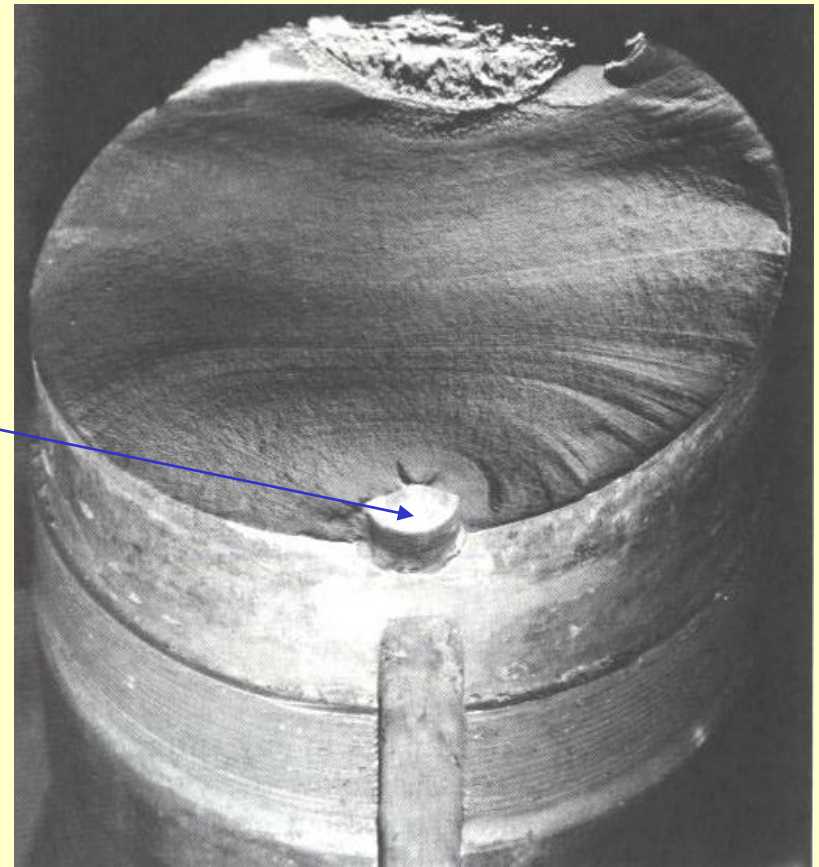
két részből, egy **kagylós**,
barázdált és egy
szemcsés ridegen tört
részből áll



Fáradt töret

Jellegzetes fáradt töret forgattyús tengelyen

- A repedés a feszültséggyűjtő helytől indult. A ridegen tört rész relatíve kicsi.



Alumínium hajtórúd fáradt törése.

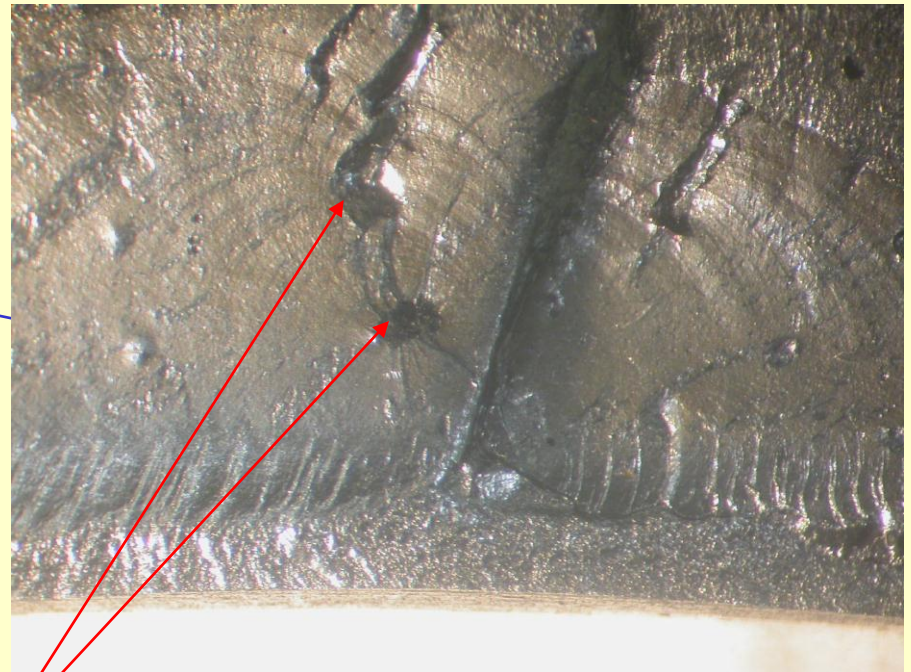


ridegtörés.

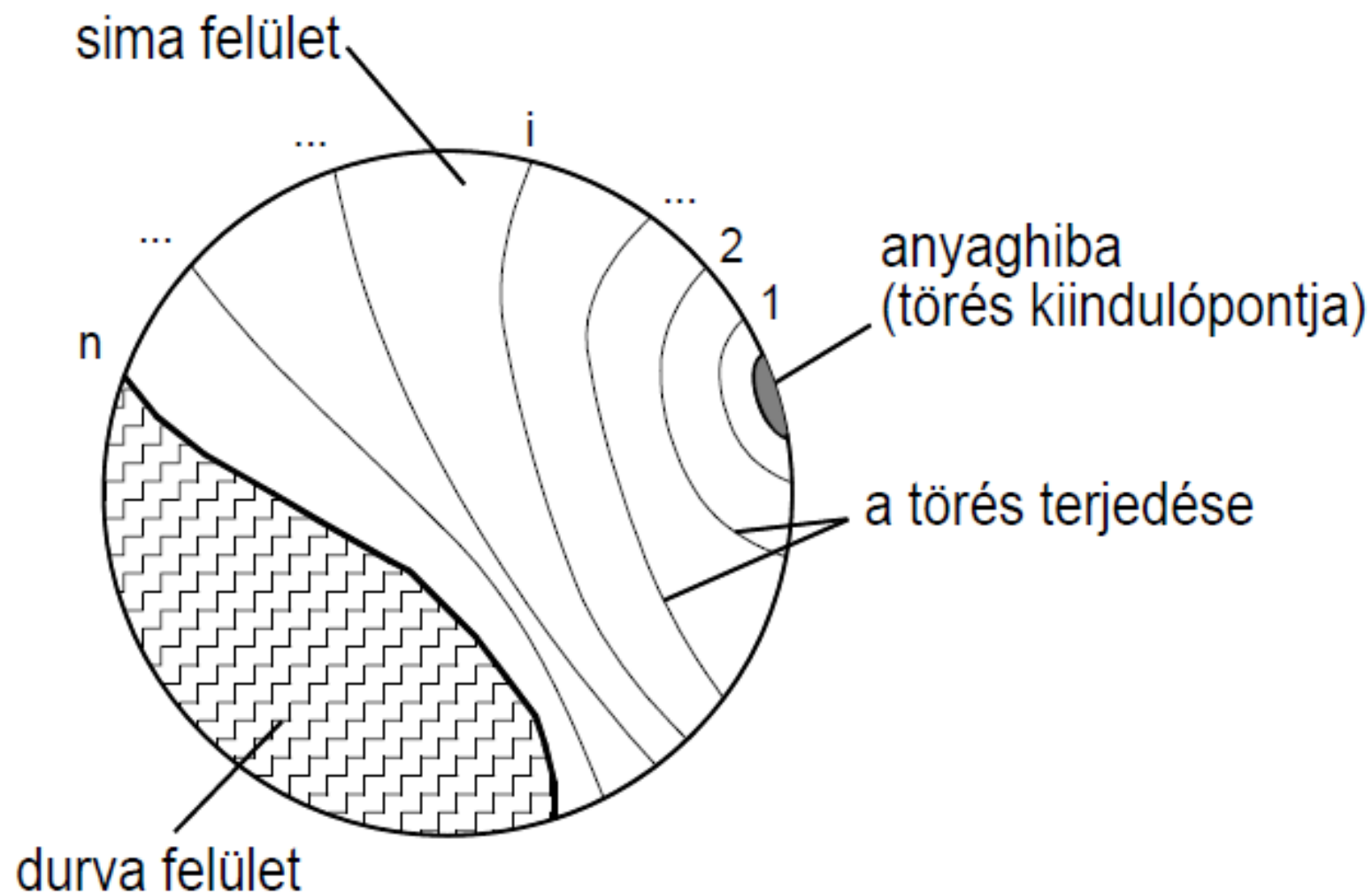
fáradási repedés
lassú terjedése.

Fáradt töret

Belső anyaghibából kiinduló fáradt töret
(tányérkerék fog)



A károsodás kiindulása



15 ábra Kör keresztmetszetű próbatest törési felülete

A kifáradásnál három részfolyamatot különböztethetünk meg

Nagyon lényeges, mert a törési káresetek kb 70-80 %-a a kifáradással kapcsolatos. A járműveknél ez az arány több is lehet!

⇒ repedés keletkezés

⇒ repedés terjedés (lassú)

⇒ instabil repedés terjedés, törés

Az ismételt igénybevételnél a feszültség általában kisebb, mint a folyáshatár

$$\sigma < R_{p0,2}$$

A kifáradás folyamata

$$\sigma < R_{p0,2}$$

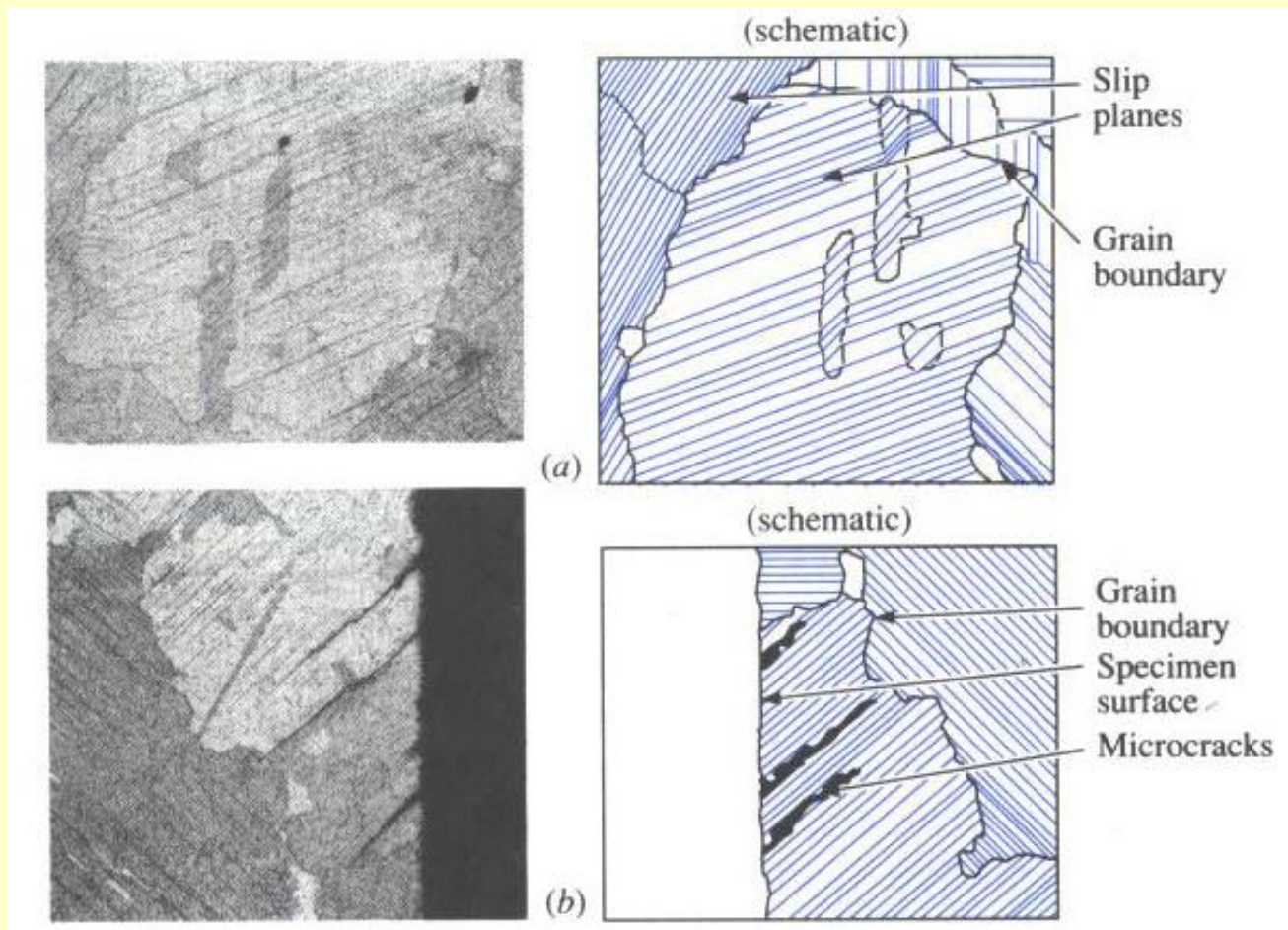
- tehát a darab makroszkóposan tekintve képlékeny alakváltozást nem szenvedhet.
- De mikroszkópos szinten! Fémes anyagaink általában nem homogének és izotrópok. Változik az egyes kristallitok orientációja, kiválások, nem fémes zárványok, anyaghibák találhatók. Az anyagban igen sok kristallit van és ezek egyéni módon reagálnak a terhelésre.

A kifáradás folyamata

I. szakasz

A kedvező helyzetű kristallitokban a folyáshatárnál lényegesen kisebb feszültség is megindíthatja a maradó alakváltozást. Ez a rugalmas alakváltozással összemérhető nagyságú, 0,1 - 0,01 %. Így a kedvező helyzetű kristallitokban **csúszósávok** alakulnak ki.

Csúszósávok



a. csúszósávok nikkel ötvözetben N 200x

A kifáradás folyamata

I. szakasz

A csúszósávok vastagsága, távolsága, száma az igénybevételtől függ. Statikus igénybevételnél a csúszósávok a terhelés növekedésével szélesednek, ismételt igénybevétel esetén azonban szélességük nem változik és az alakváltozás ezeken belül zajlik.

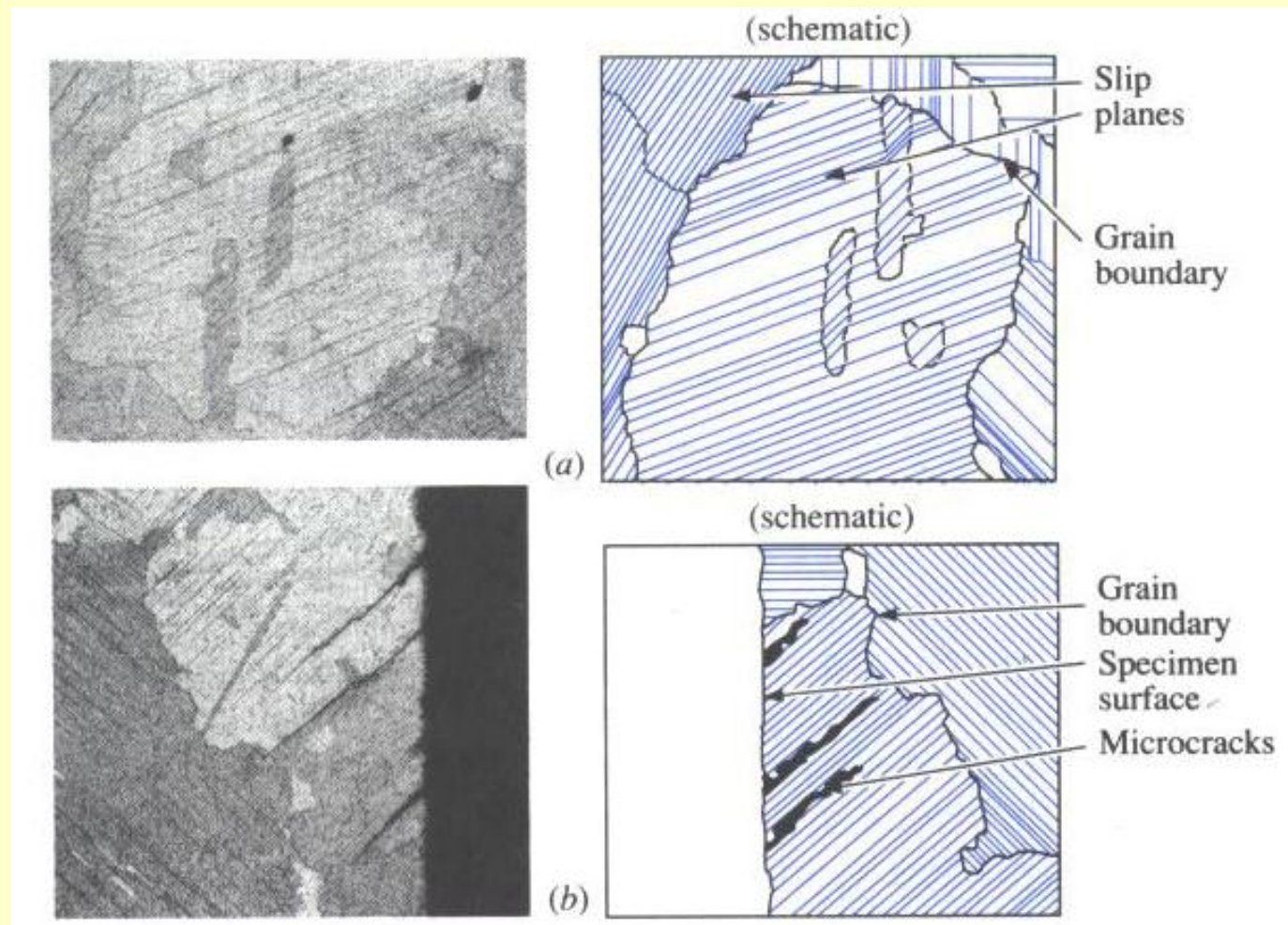
Ez a jelenség legkönnyebben a felületen jöhet létre.

A kifáradás folyamata

I. szakasz A repedés keletkezése

A diszlokációk irreverzibilis mozgása, az alakváltozás eredményeként létrejövő felkeményedés, a csúszósávok alakváltozó képességének kimerülését eredményezik.

Mikropórusok, szubmikroszkópos repedések jönnek létre. Itt a teherviselés lecsökken, az alakváltozás más helyen folytatódik.

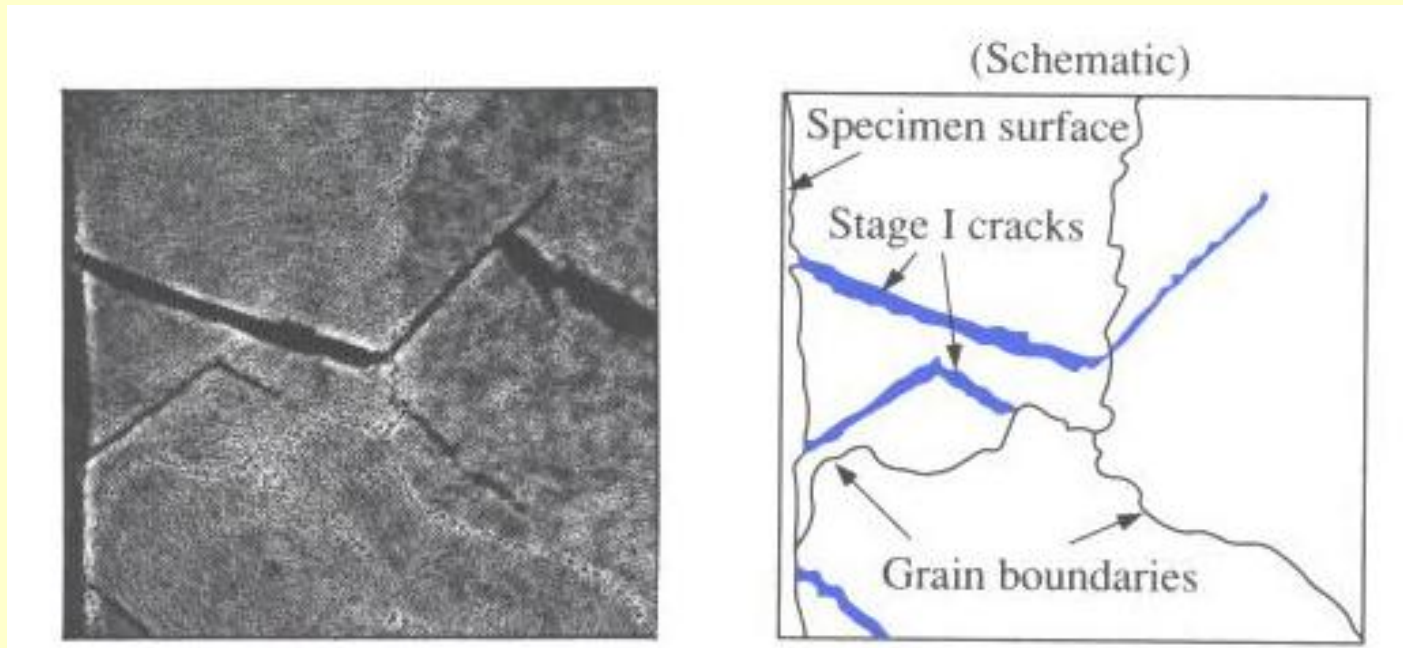


A csúszósávok és a felület találkozásánál **repedések** jönnek létre (b. ábra) Ez a I. szakasz.

A kifáradás folyamata

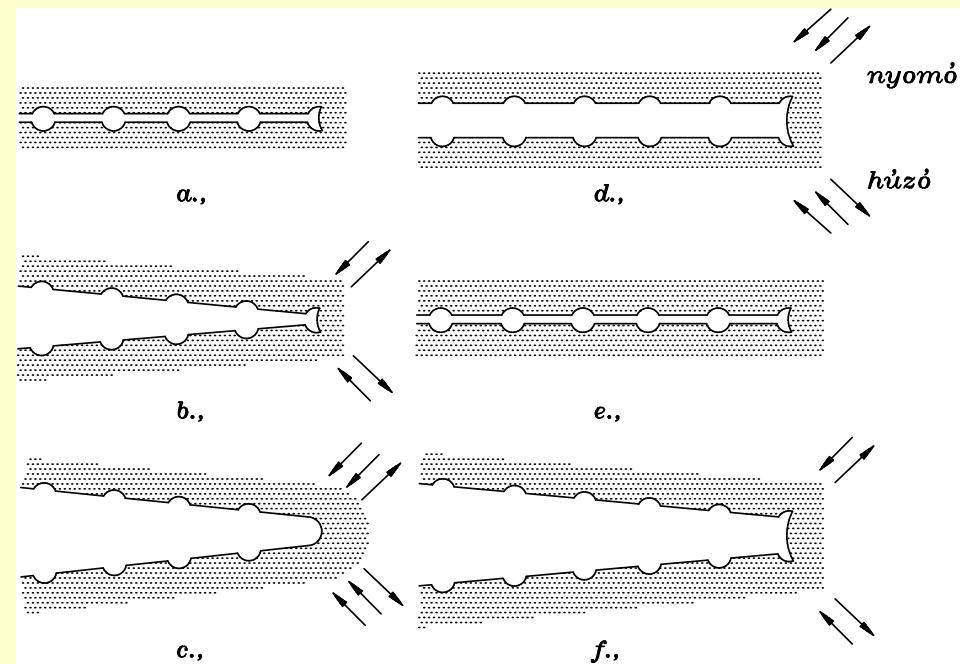
II. szakasz, a repedés terjedése

Ha a szomszédos krisztallit is kedvező helyzetű, a szubmikroszkópos repedés terjed.



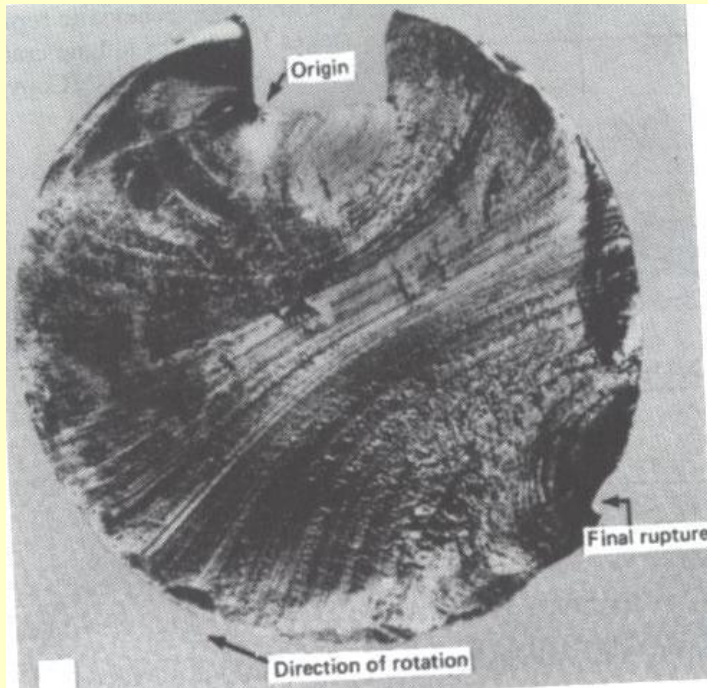
A kifáradás folyamata II. szakasz, a repedés terjedése

Ha a mikroszkópos repedés bizonyos nagyságot elér, makroszkópos repedéssé válik, és növekedését erősebben szabályozzák a húzó, mint a nyírófeszültségek. A repedés a maximális húzófeszültségre merőleges síkba fordul és terjed. Ez a II. szakasz



A kifáradás folyamata II. szakasz, a repedés terjedése

A repedés ciklusonként növekszik, ami barázdák kialakulásához vezet.



Megjegyzés

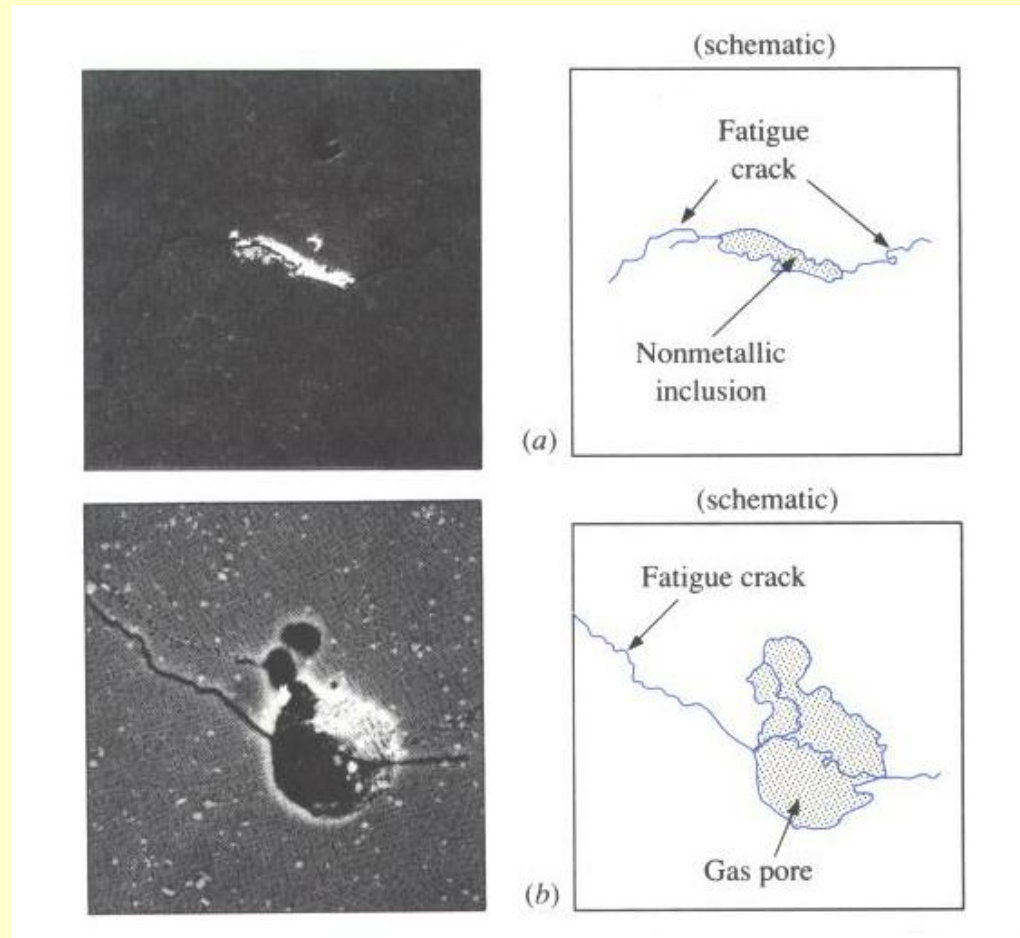
az egyes szakaszok egy adott darab esetében csak adott helyen különíthetők el, mert a jelenségek a darab felületén nagyon sok helyen kialakulnak, és nagyon különböző stádiumban lehetnek.

A kifáradás folyamata

III. szakasz. Végső törés

Amikor a terjedő repedés mérete eléri a kritikus repedésméretet a terjedése instabillá válik, a darab ridegtöréssel eltörik. A repedés keletkezésével kapcsolatos jelenségek legkönnyebben a felületen jöhetnek létre, ezért az anyag kifáradással szembeni ellenállásában a felületnek nagy szerepe van.

„Belső felület” hatása



A **zárvány**, vagy **mikropórus** belső felület, ahol hasonló jelenségek alakulhatnak ki

A kifáradás vizsgálata

Repedést nem tartalmazó alkatrészek kifáradása ⇒ nem tartalmaz kezdeti makrorepedést ⇒ az élettartamot főleg a repedés keletkezése határozza meg ⇒ a darabok kis méretűek pl. tengelyek, hajtó karok, fogaskerék fogak, csapágy görgők stb.	A repedést tartalmazó szerkezetek kifáradása ⇒ a szerkezet tartalmaz makrorepedéseket ⇒ az élettartamot a repedés terjedése határozza meg ⇒ általában nagy, gyakran , hegesztett szerkezetek pl. hidak, hajók, nyomástartó edények stb.
Nagy ciklusú fárasztás ⇒ a feszültség kisebb, mint a folyáshatár ⇒ a törés általában $>10^4$ ismételés után következik be ⇒ ilyenek: a forgó és rezgő alkatrészek pl. tengelyek, fogak, motor alkatrészek	Kis ciklusú fárasztás ⇒ a terhelő feszültség nagyobb, mint a folyáshatár ⇒ a törés általában $<10^4$ ismételés után következik be ⇒ ilyenek pl. a feszültséggyűjtő helyek, mint pl. éles sarkok, bemetszések



a törés az anyag maradó alakváltozása nélkül következik be

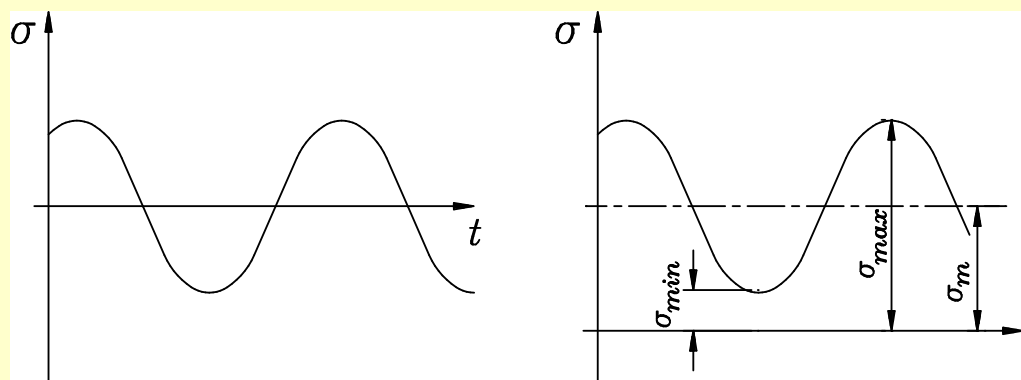
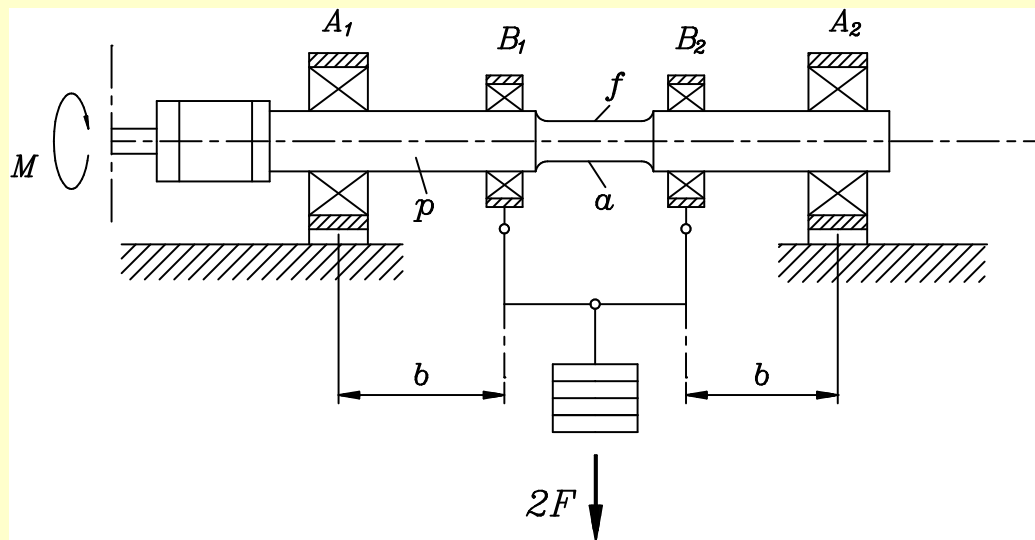
jelentős plasztikus alakváltozás (pl. huzal eltörése hajlítgatással)

A repedést nem tartalmazó alkatrészek kifáradása

Kifáradás vizsgálata

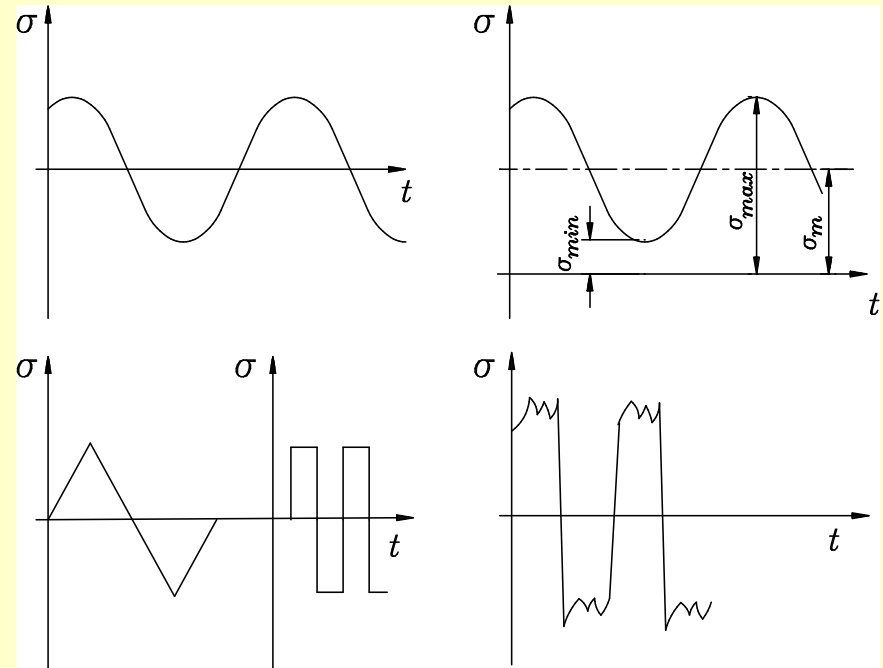
A jelenségre a múlt század második felében vasúti tengelyek hosszabb idejű üzemelése után bekövetkező jellegzetes törése hívta fel a figyelmet. A jelenséget Wöhler a vasúti tengelyek igénybevételének modellezésével vizsgálata.

Forgó-hajlító igénybevétel (Wöhler kísérlet)

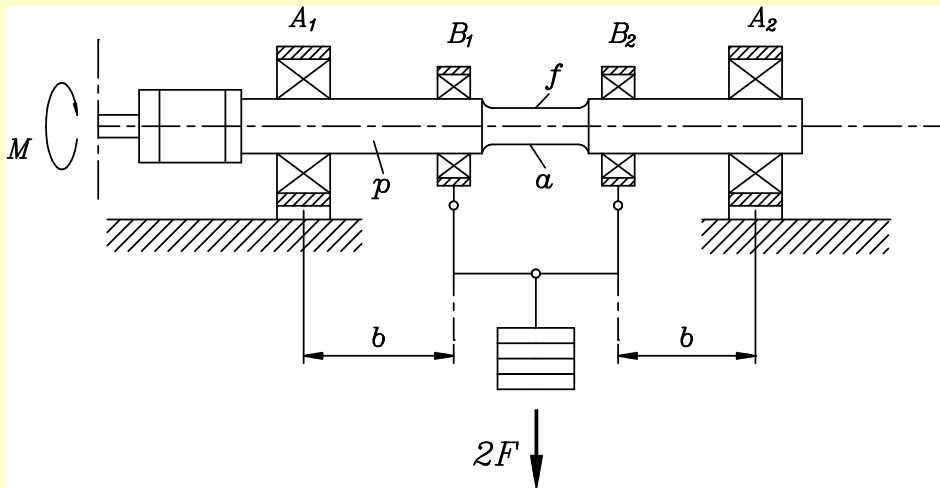


Az igénybevétel

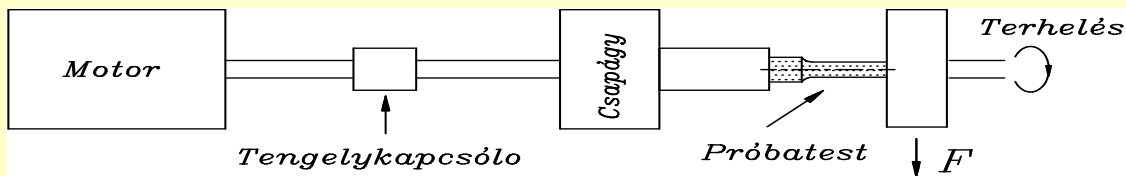
- A kifáradás során a feszültség az időben változik és sokszor ismétlődik.
- A vizsgálatok során a feszültség legtöbbször szinusz görbe szerint, de más jelalak szerint is változhat.



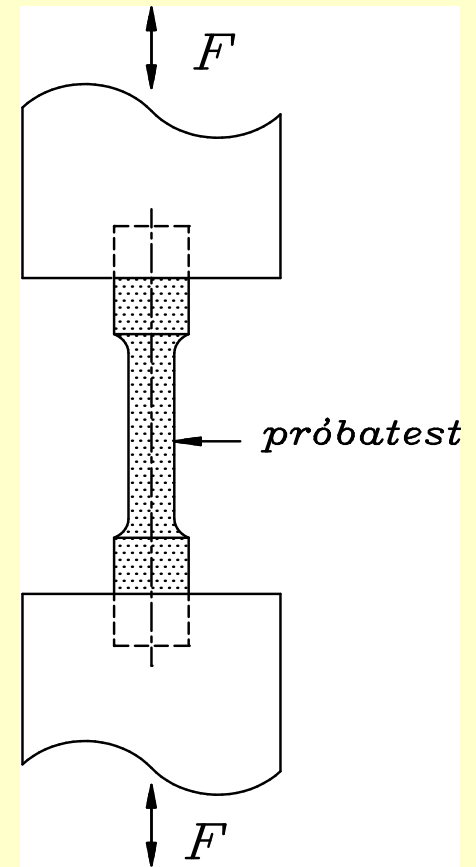
Vizsgálati módok



Forgó-hajtogató



Forgó-csavaró



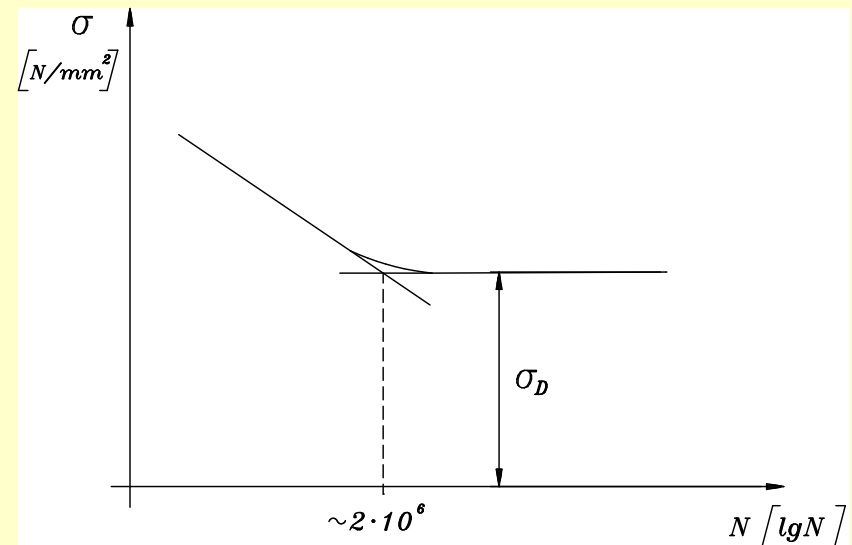
Húzó-nyomó

Nagyciklusú fárasztó vizsgálatok

- **A vizsgálatok során a próbatestre ható feszültség minden esetben kisebb, mint a folyáshatár.** Ezek a vizsgálatok tekinthetők a klasszikus fárasztó vizsgálatoknak. A kísérletek során különböző terhelésekre meghatározzuk a töréshez tartozó ismétlések számát, és azt ábrázoljuk.

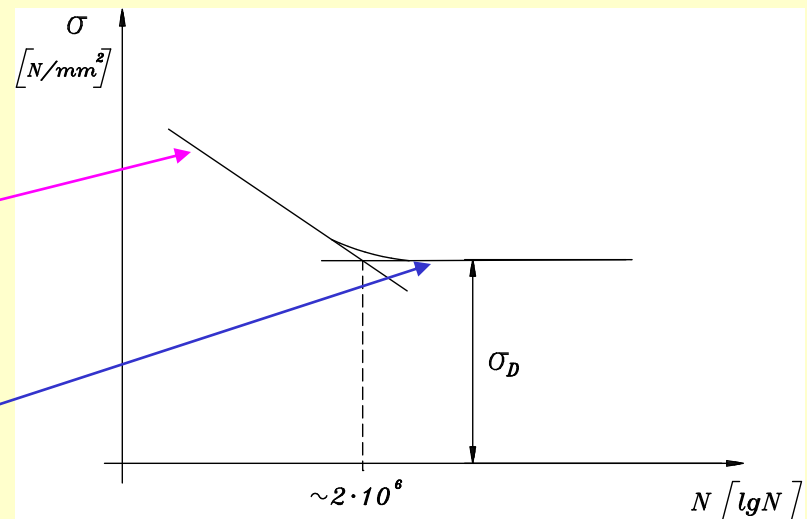
Wöhler görbe (1858)

A görbe aszimptotikusan közelít egy értékhez, így a terhelő feszültség csökkentésével, az acélokra meghatározható egy olyan jellemző feszültség, amellyel az akár végtelen sokszor terhelhető anélkül, hogy eltörne. Ezt a feszültséget az acél **kifáradási határának** nevezzük. Jele: σ_D .



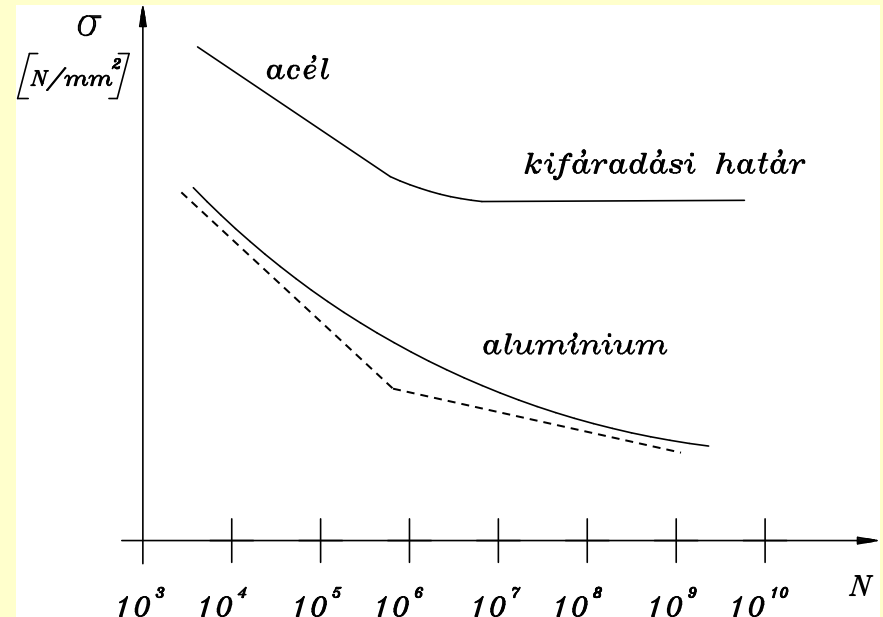
Acélok Wöhler görbéje

A Wöhler görbe két jól elkülöníthető szakaszból áll. Az első ferde, meredeken eső szakaszt **élettartam szakasznak**, a vízszintes részt, pedig **kifáradási szakasznak** nevezzük. A két egyenes acéloknál 2 - 5. 10^6 igénybevételnél metszi egymást.



Meghatározható-e minden anyagnál kifáradási határ?

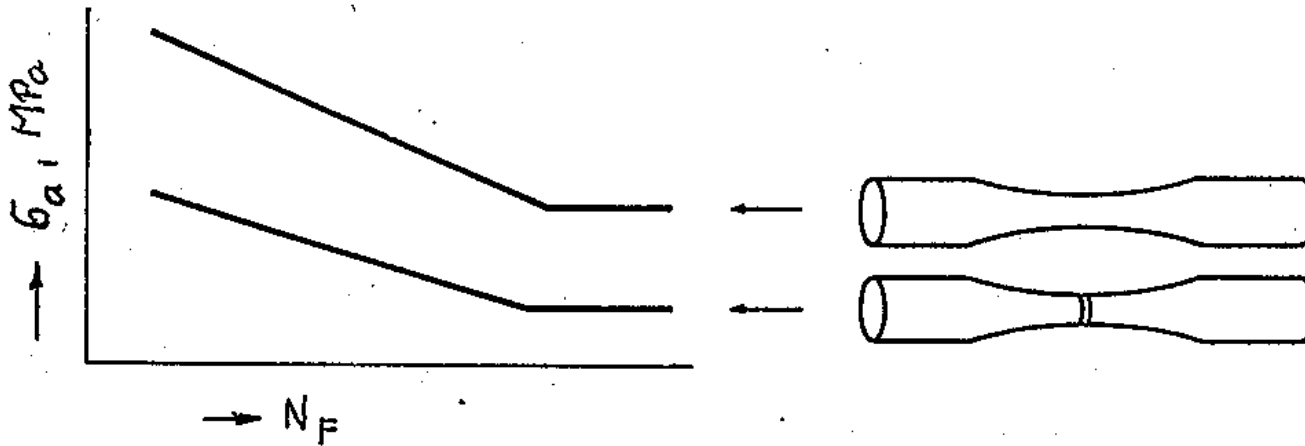
nem minden anyagnak van kifáradási határa.
Alumínium ötvözetek, saválló acélok, nagyszilárdságú acélok esetében a Wöhler görbe második szakasza nem vízszintes, így kifáradási határ nem értelmezhető.



A szerkezeti anyagok viselkedése ismételt igénybevétel során

- **Polimerek**, a fémekhez hasonló, bár az anyagban zajló mikroszkópos folyamatok mások
- **kerámiák**, ridegek, esetükben kifáradásról nem beszélhetünk

Bemetszés hatása a kifaradási jellemzőkre



A fárasztó vizsgálatokkal meghatározott eredmények értékelése, használata

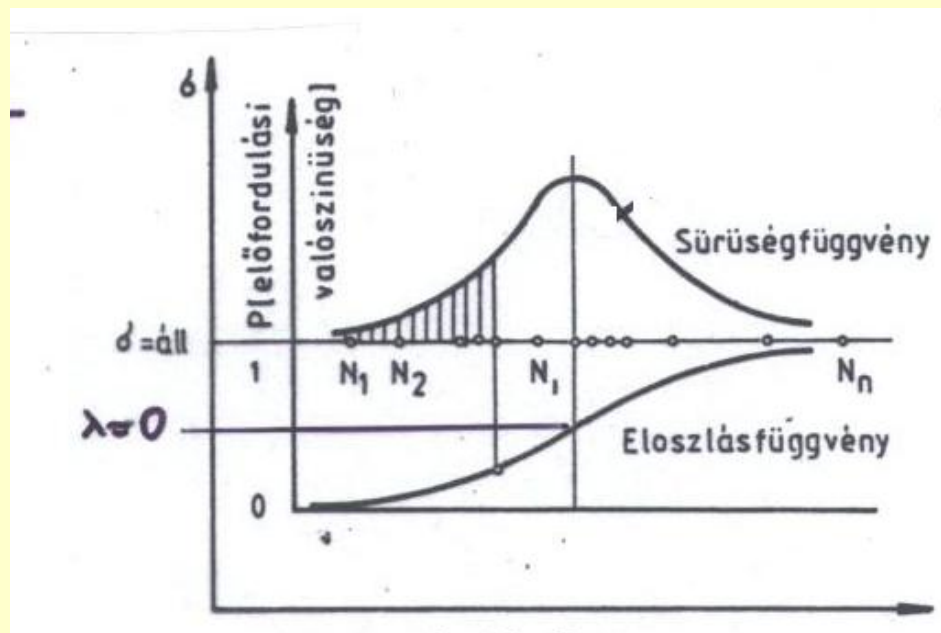
- A kifáradás sztohasztikus folyamat, nem lehet átlagolni! **Az egy feszültség szinten végzett mérés nem a törést okozó igénybevételi számot, csak annak egy lehetséges értékét adja meg.**
- Sok a véletlen tényező

Mi a megoldás?

A mérési eredményeket matematikai statisztikai módszerekkel kiértékelve adott törési illetve túlélési valószínűséggel adhatjuk meg az adott terheléshez tartozó ismétlési számot. A matematikai statisztikai kiértékeléshez sok, feszültségszintenként legalább 10 próbatest szükséges.

A mérési adatok feldolgozása

- A Gauss log - normál eloszlás két paraméteres , de a valószínűségi változó matematikailag (esetünkben a töréshez tartozó ismétlési számok logaritmus, $\lg N$) a $\pm \infty$ között változik, és így az eloszlás nem rendelkezik olyan minimális élettartammal amely alatt a törés valószínűsége nulla.



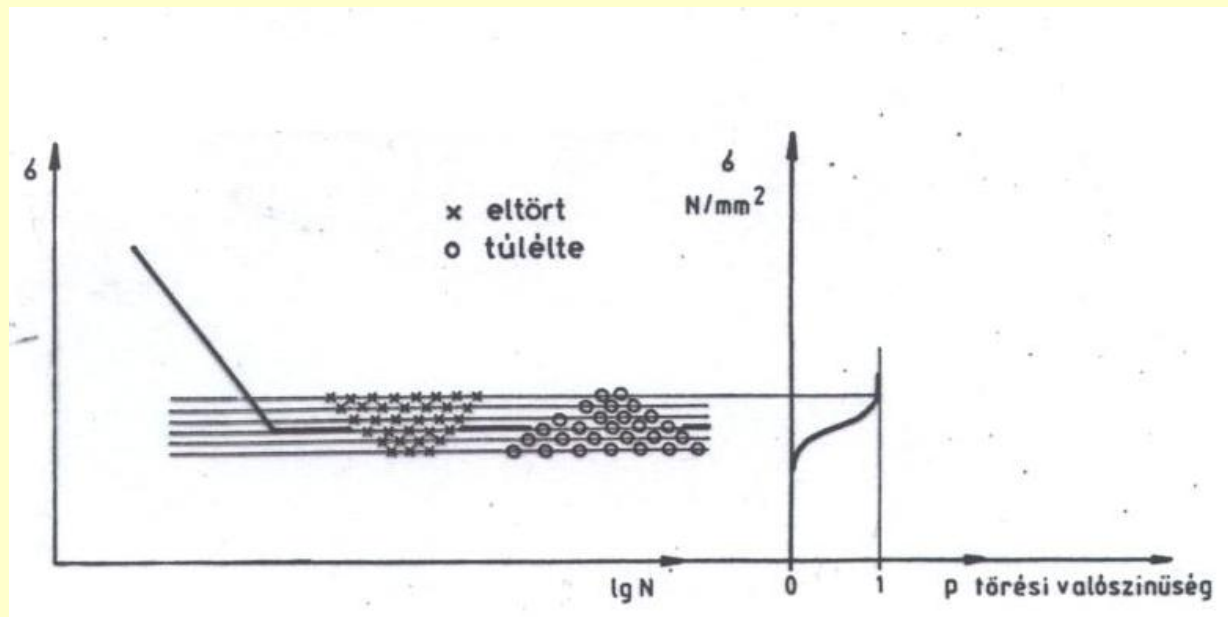
Weibull eloszlás

- A Weibull eloszlás három paraméteres. Akkor használjuk, ha a 0 törési valószínűséghez tartozó N_0 értéket ki akarjuk jelölni. A valószínűségi változó N . A paramétereket grafikusan kell meghatározni.

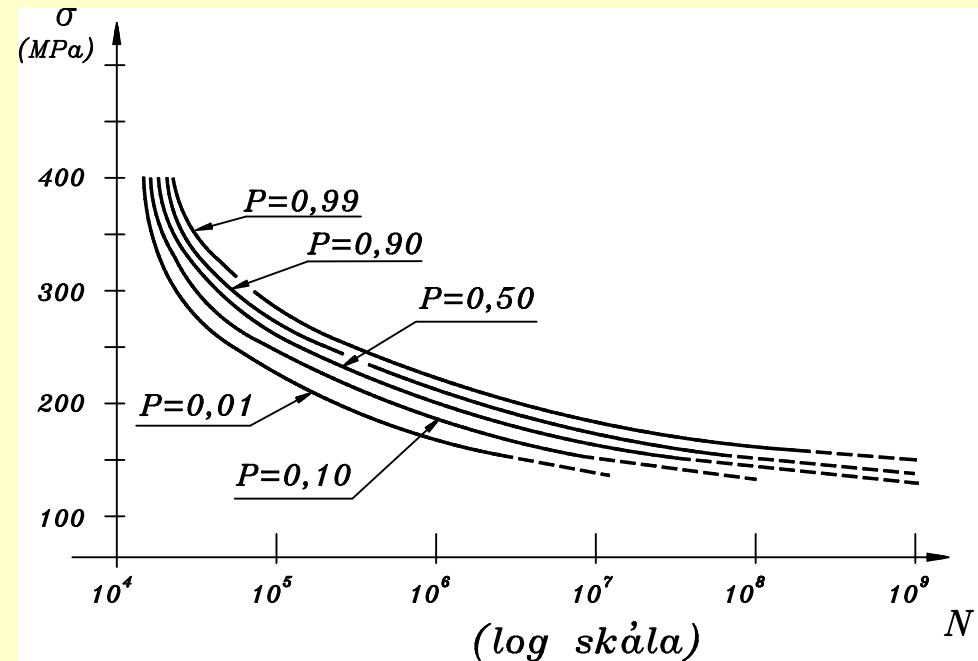
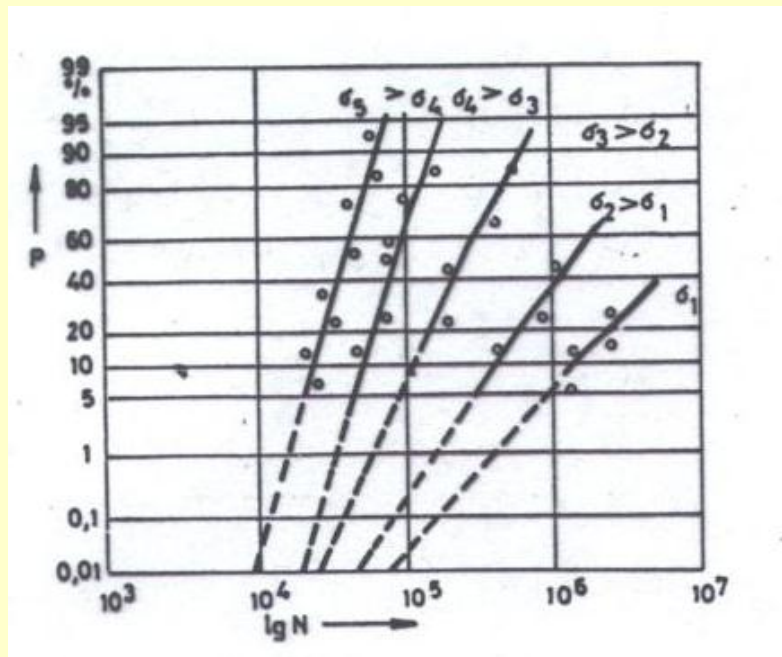
Vizsgálati módszerek

Probit módszer

- A mérés célja lehet a kifáradási határ vagy valamilyen adott ismétlési számhoz tartozó terhelés meghatározása.



Az eredmények megadása

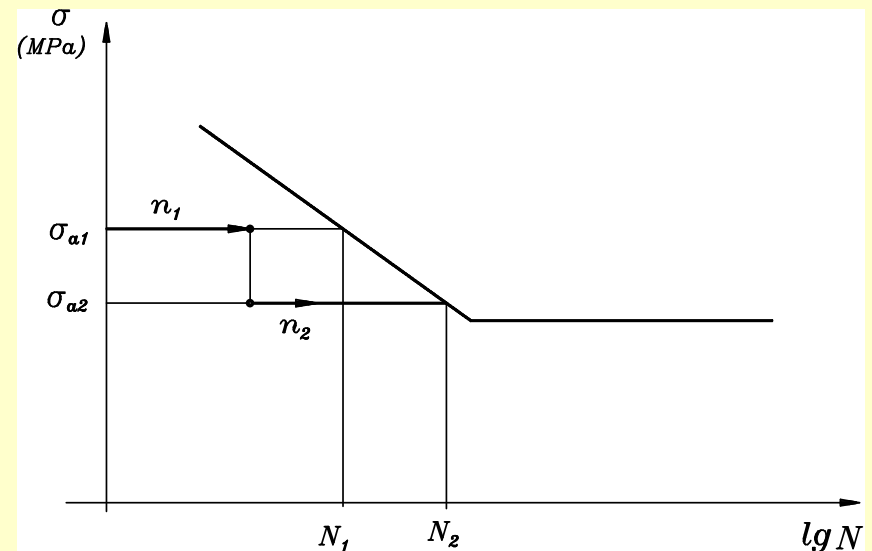


Halmazódó károsodás elmélete

- A gyakorlatban a feszültség általában nem szabályos sinusgörbe szerint változik, hanem legtöbb esetben különböző igénybevételek ismétlődéséből áll. Ennek megfelelően a feszültségspektrumban különböző amplitúdójú igénybevételek fordulnak elő. A különböző igénybevételek hatása az anyagban összegződik, a károsodások halmazódnak és töréshez vezethetnek.

A halmozódó károsodások Palmgren - Miner hipotézise

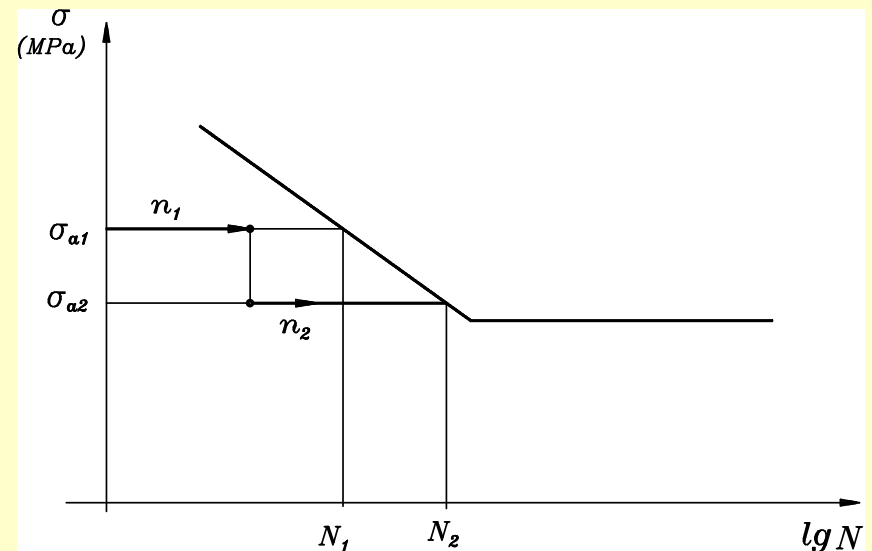
egy anyag kifáradásához az anyagra jellemző munka bevitele szükséges függetlenül attól, hogy az nagy feszültségen kevés számú vagy kisebb feszültségen nagyobb számú ismétlés után következik be.

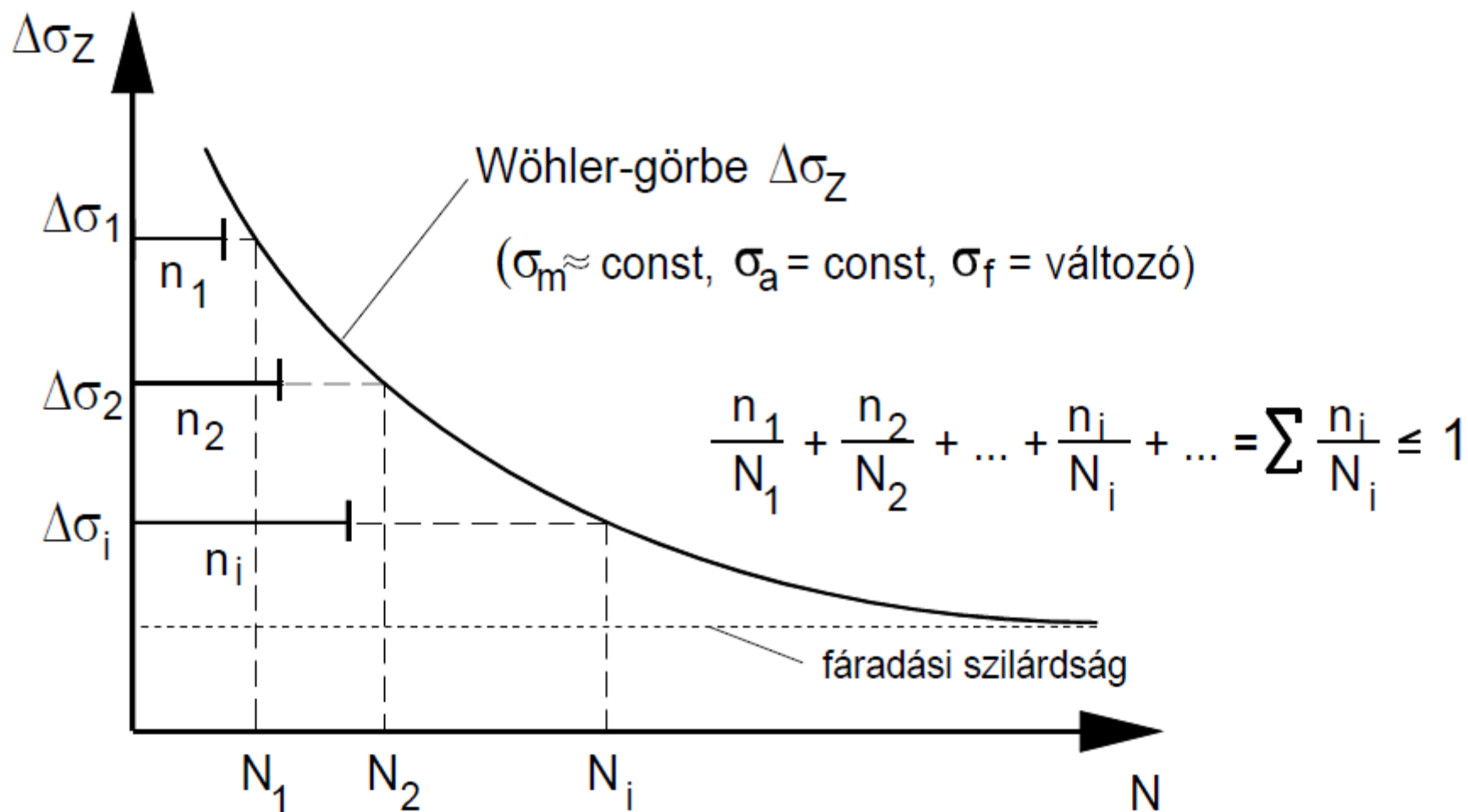


A halmozódó károsodások Palmgren - Miner hipotézise

σ_{a1} szinten N_1 , σ_{a2} feszültségi szinten pedig N_2 ismétlési szám okoz törést

σ_{a1} feszültségi szinten n_1 ($n_1 < N_1$), σ_{a2} feszültségi szinten n_2 ($n_2 < N_2$) ismétlésig terheljük, a munkának csak $w \frac{n_1}{N_1}$ része nyelődik el, a σ_{a2} szinten pedig $w \frac{n_2}{N_2}$





27 ábra Lineáris károsodási hipotézis

A törés kritériuma

$$W = W \frac{n_1}{N_1} + W \frac{n_2}{N_2}$$

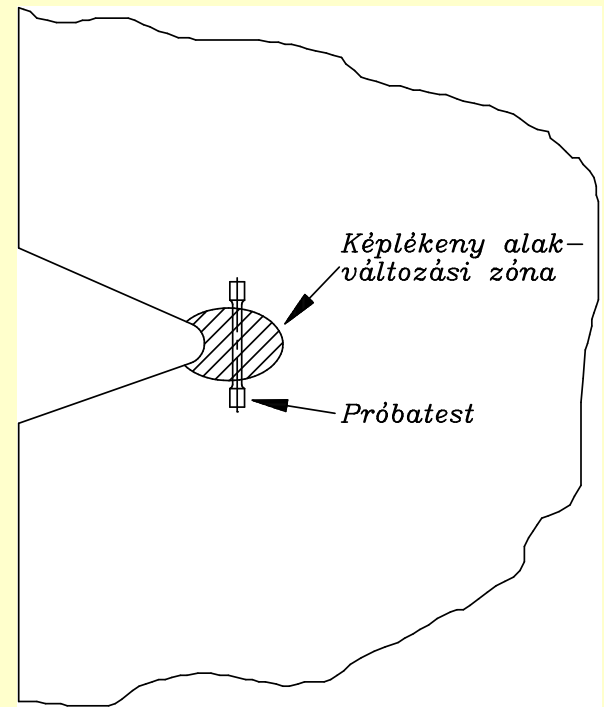
$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1$$

A Palmgren Miner elmélet hibája

- feltételezi, hogy a különböző feszültségszinteken végzett munka állandó, valamint, hogy az egyes ciklusokban elnyelt munka sem változik, jóllehet a próbatest anyaga a fárasztás során károsodik, felkeményedik, repedések keletkeznek, a makrorepedés egyre nő, stb.
- Továbbá azt sem veszi figyelembe, hogy a törési munka kismértékben függ a fárasztás frekvenciájától is.

Kisciklusú fárasztóvizsgálat

A kisciklusú fárasztóvizsgálatokkal a feszültséggyűjtő helyek környezetében képlékeny alakváltozást szenvedő anyagrész viselkedését modellezik.



Kisciklusú fárasztóvizsgálat

Ezekén a helyeken a feszültség minden ciklusban meghaladhatja a folyáshatárt. A kisciklusú fárasztóvizsgálatot az jellemzi, hogy a feszültség a folyáshatárnál nagyobb, a törésig elviselt terhelési ciklusok száma általában kisebb, mint 10^4 .

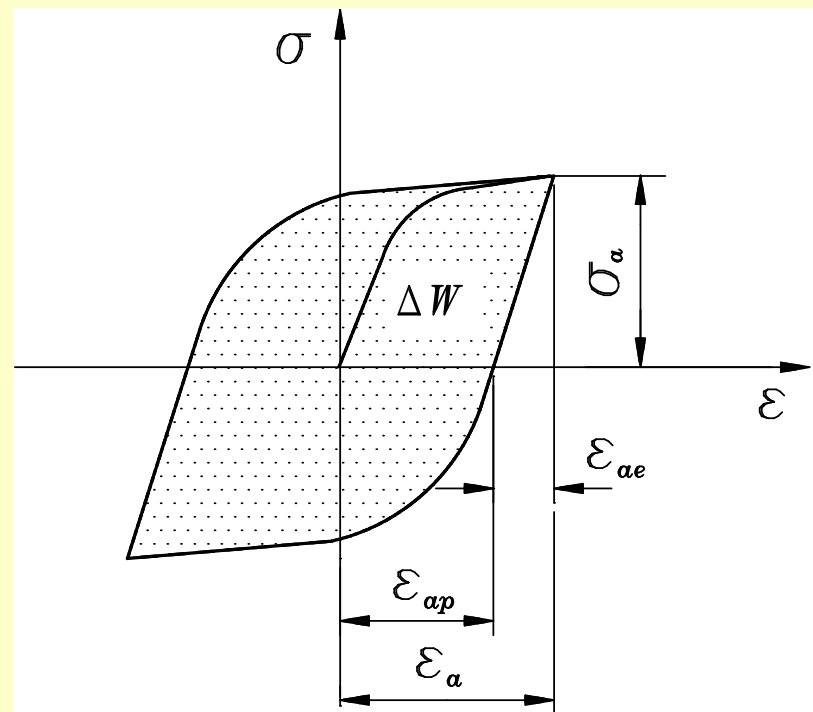
Hol fordulhat elő?

Kisciklusú kifáradást eredményezhet pl. a vegyiparban, energiaiparban , nyomástartó edények körében az indításkor és leálláskor bekövetkező hőmérséklet változások miatti feszültségváltozás, a hideg vagy meleg közeg gyors betáplálása, a plattírozott lemezből készült nyomástartó edények hőmérsékletének változása a különböző hőtágulási együtthatók miatt stb.

Kisciklusú fárasztóvizsgálat

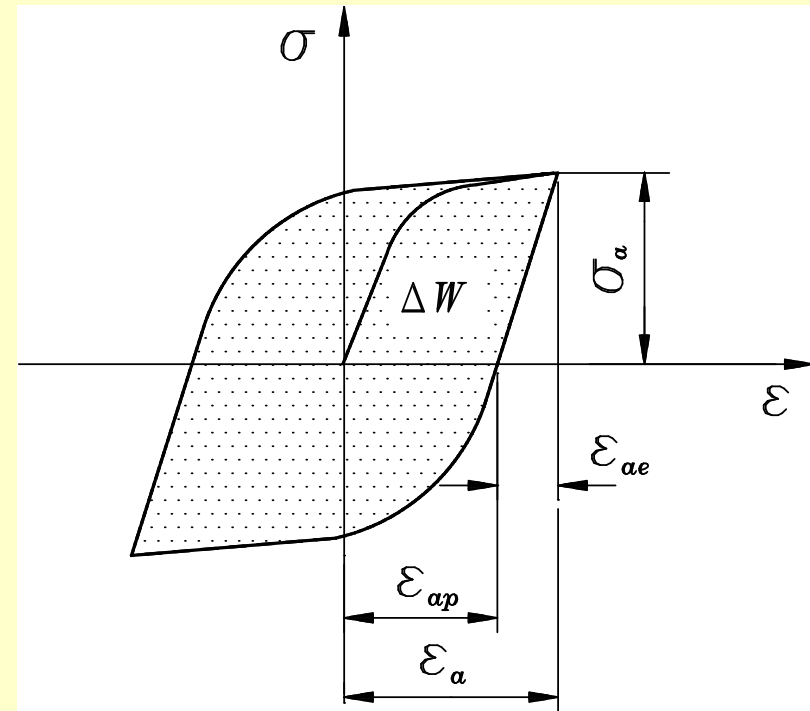
A vizsgálat során a kisméretű próbatestet húzó és nyomó igénybevétellel terheljük.

Az alakváltozás az első fél ciklusban először rugalmas, majd a terhelés növelésével képlékennyé válik. Ha a próbatestet tehermentesítjük, maradó alakváltozást észlelünk. A második fél ciklusban anyag a nyomó feszültség hatására újra képlékenyen alakváltozik



Kisciklusú fárasztóvizsgálat

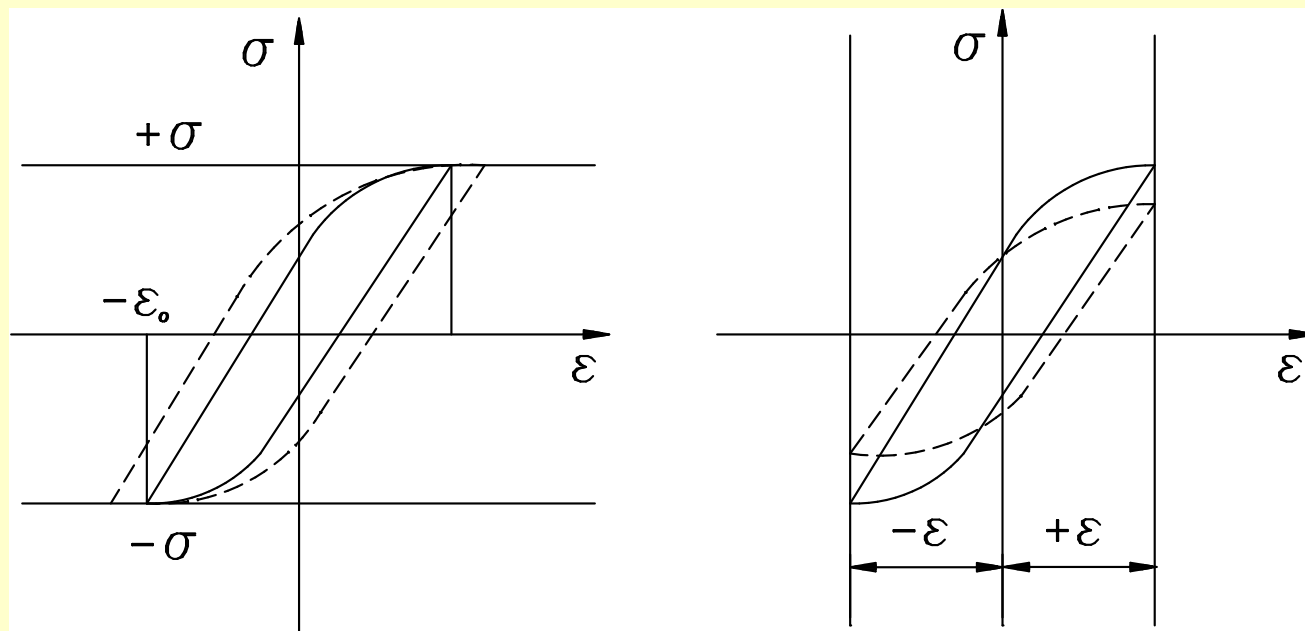
Az alakváltozás két részből, rugalmas (ε_{ae}) és képlékeny (ε_{ap}) áll. A hiszterézis görbe területe a térfogategységbe befektetett munkával (ΔW) arányos, amelynek egy része hővé alakul, a másik pedig az anyagban mikroszerkezeti változásokat okoz és végül repedések keletkezéséhez, terjedéséhez, végül töréshez vezet.

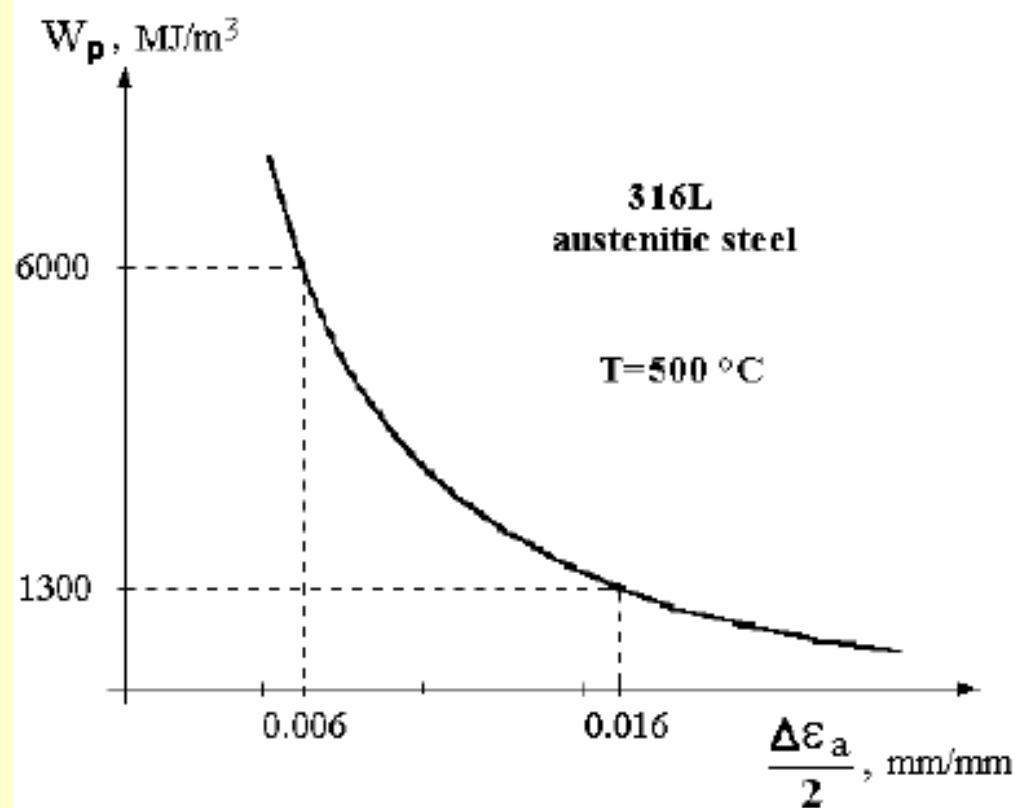


Hogyan terheljük a próbatestet?

A próbatestek terhelése során két lehetőség van. Ezek:

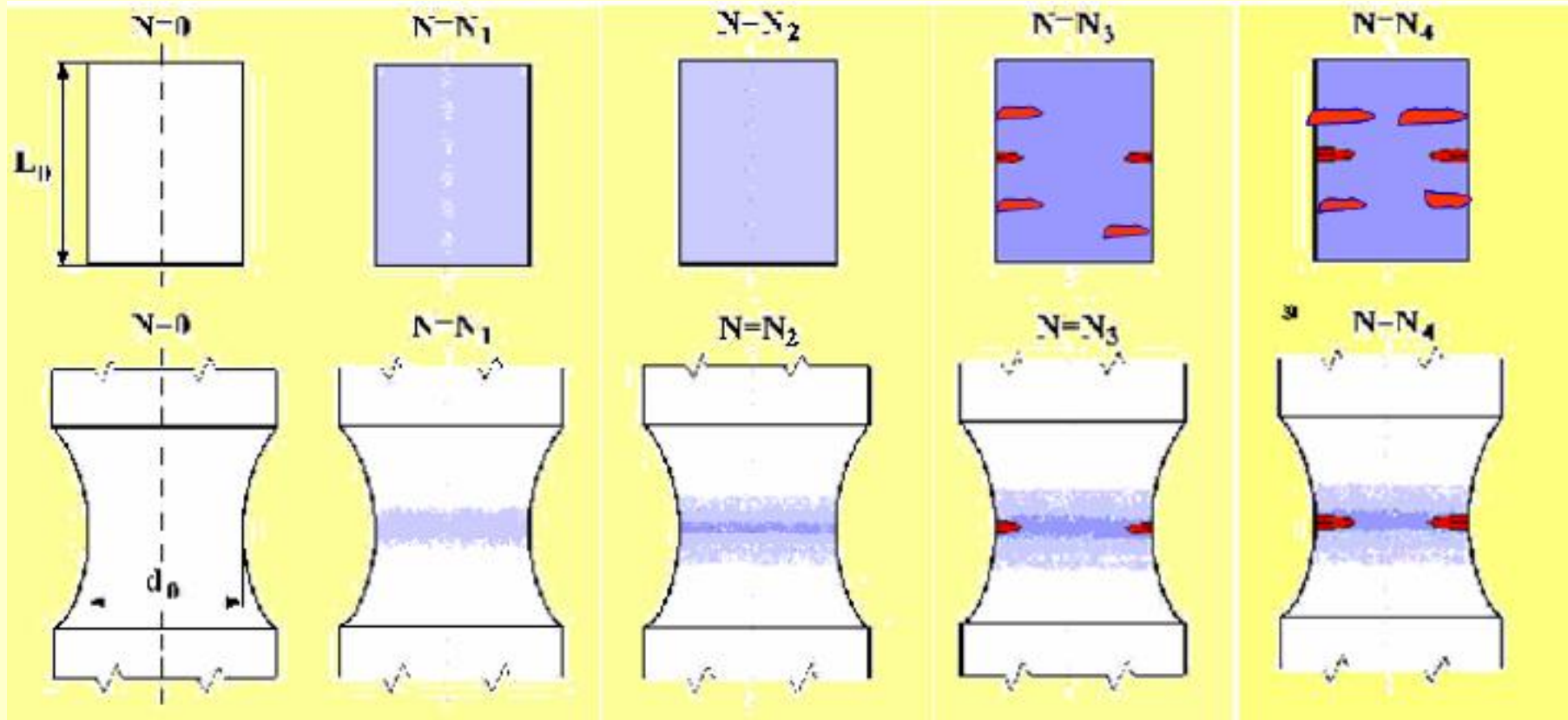
- a kísérletet során vagy a feszültséget tartjuk állandó értéken (feszültség kontrol) vagy az
- alakváltozást (alakváltozás kontrol).





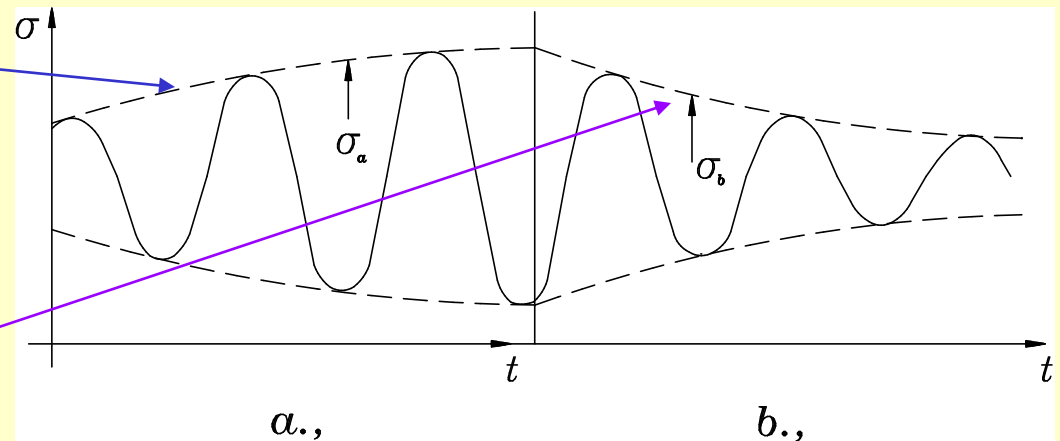
Törésig befektetett munka - alakváltozási amplitúdó diagram
axiális nyúlásvezérlés esetén

Károsodási mechanizmus hengeres és tóruszos próbatest esetén



Hogyan viselkednek az anyagok?

A teljes alakváltozási amplitudóra végzett szabályozáskor a feszültségamplitudó nőhet (ciklikusan keményedő anyag) vagy csökkenhet (ciklikusan lágyuló anyag)



A felkeményedés vagy lágyulás az élettartam első 10 -20 %-ban lényegében lejátsszódik és a feszültségamplitudó egy állandó értéket vesz fel. Ebben az esetben az egymást követő ciklusokban felvett hiszerézis görbék között sem mutatható ki különbség. A fárasztás során ezt állandósult állapotnak nevezzük.

Manson - Coffin egyenlet

- a képlékeny alakváltozás amplitudó és a tönkremeneteli ciklusszám között adja meg a kapcsolatot.

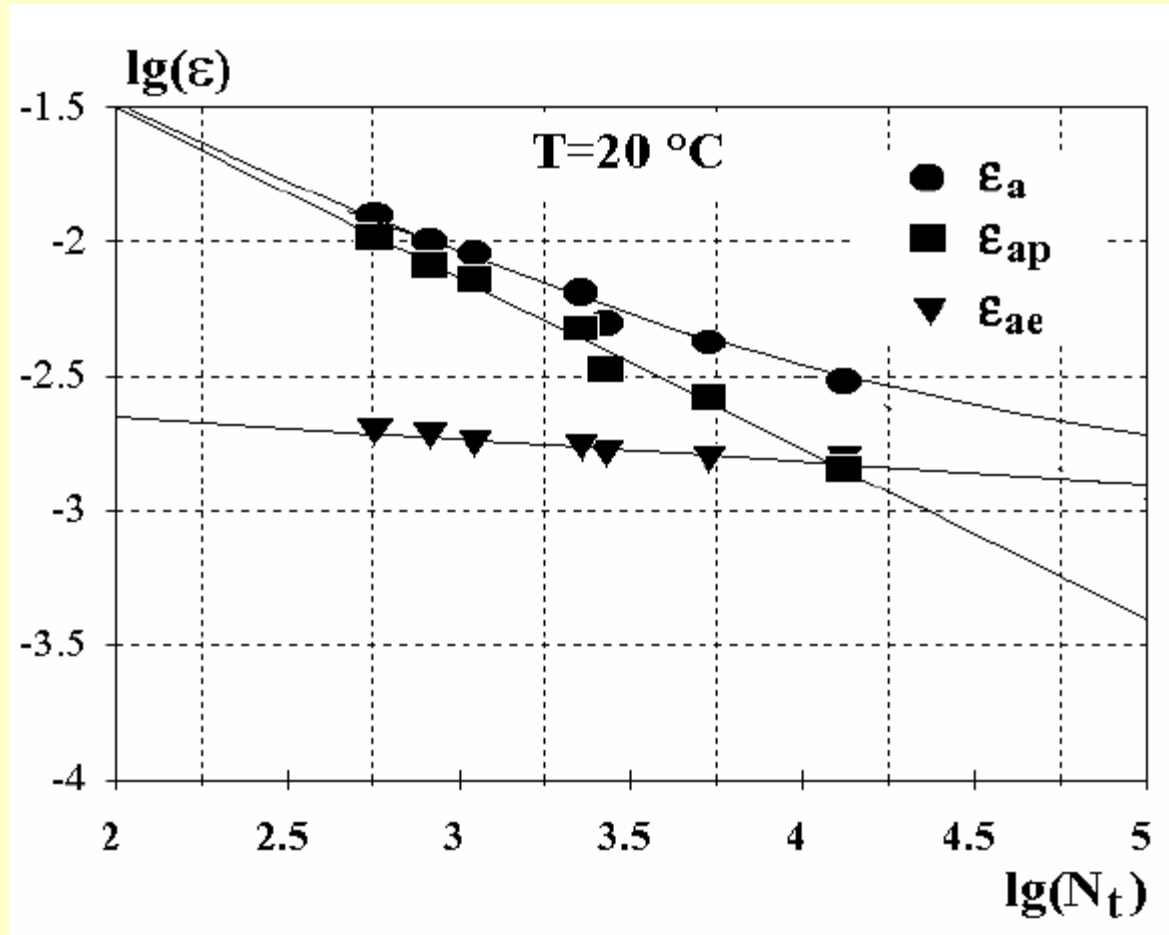
$$\epsilon_{ap} = \epsilon'_f N_t^c$$

ahol: ϵ_{ap} : képl. alakv. amplitudó, N_t : tönkremeneteli ciklusszám, ϵ'_f és c a mérési eredményekből meghatározható paraméterek.

- Az adatokat kettős logaritmikus léptékben ábrázolva egyenest kapunk.

Manson - Coffin egyenes

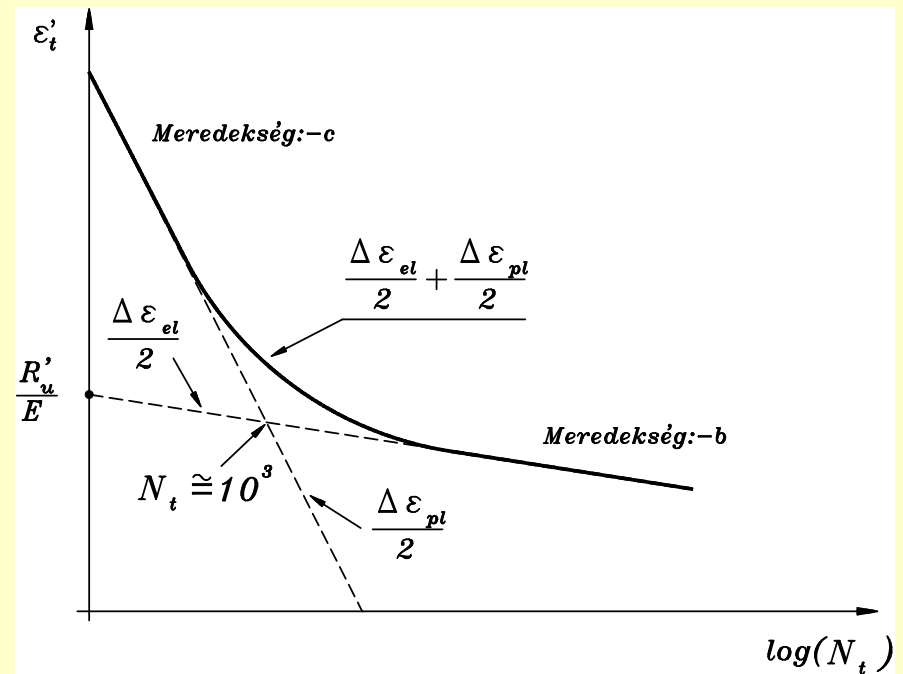
kisciklusú fársztóvizsgálat eredményeinek ábrázolása



A képlékeny alakváltozás amplitudó és a tönkremeneteli ciklusszám közötti kapcsolat.

Teljes Wöhler görbe

A mért értékeket szokás
kiegészíteni a
nagyciklusú fáradásra
vonatkozó adatokkal is



$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma'_f}{E} N_t^b + \varepsilon'_f N_t^c$$

A teljes Wöhler-görbe, ill. a Manson-Coffin egyenes alapján, az ε_a , vagy az ε_{max} ismeretében a repedés keletkezéséhez szükséges ciklusszám becsülhető, ha a terhelés nem rendszertelen.

Repedést tartalmazó szerkezetek kifáradása

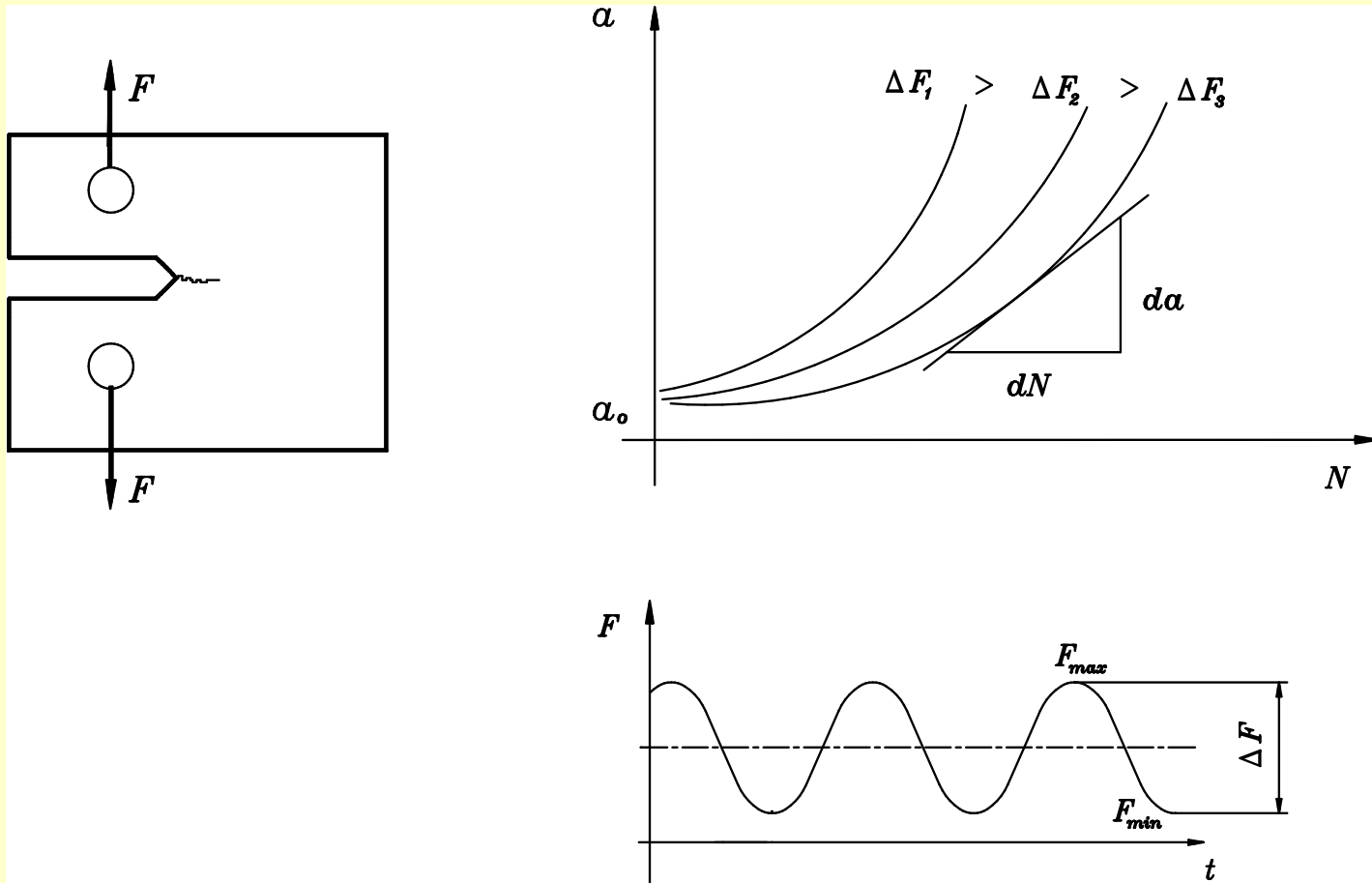
Repedést tartalmazó szerkezetek kifáradása

- A nagyméretű, hegesztett szerkezetek mint pl. a hidak, hajók, nagyméretű nyomástartó edények mindig tartalmaznak hibákat. A legtöbb esetben ezek a hibák a szerkezet üzembe helyezésekor kisebbek, mint amit az ellenőrzésre előírt módszerrel ki tudunk mutatni. A szerkezetekben lévő hibák azonban lassú repedésterjedéssel, amit a fárasztás okoz, növekednek.

Repedést tartalmazó szerkezetek kifáradása

- Fontos tudnunk tehát, a szerkezet várható élettartamát, vagyis azt az ismétlési számot, ami a szerkezetben lévő hibák méretének kritikus értékűre növekedéséhez vezet.
- Ezt a repedés terjedés sebességének ismerete teszi lehetővé.

A repedés terjedési sebességének meghatározása



Megállapítható, hogy a feszültség szint növelése csökkenti az élettartamot (a törésig elviselt ciklusok számát), továbbá, hogy a repedés terjedésének sebessége növekszik a repedés hosszának növekedésével .

A terhelésből és a hibaméretből meghatározható egy feszültségintenzitási tényező, jele : K

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

Paris - Erdogan összefüggés

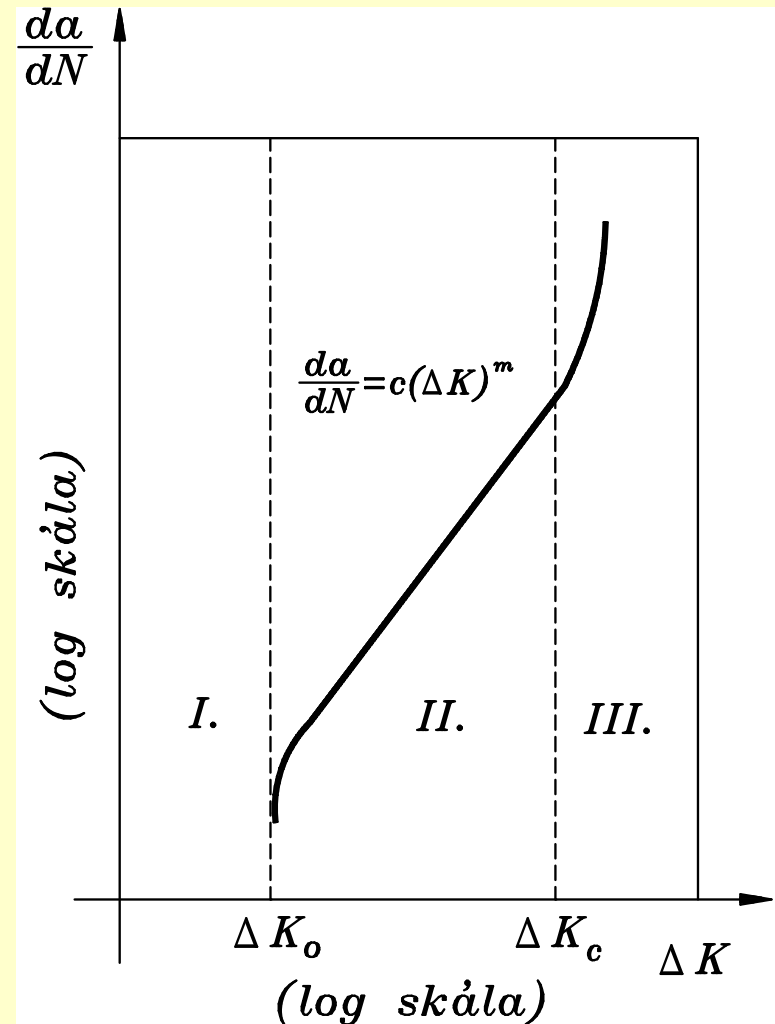
- A fáradt repedés terjedésének sebessége a feszültségintenzitási tényező függvényében egy empirikus összefüggéssel kifejezhető.

$$\frac{da}{dN} = A (\Delta K)^m$$

Az A és m anyagjellemző konstansok.

Az m értéke 1-6 között van

Az összefüggés kettős log léptékben egyenes



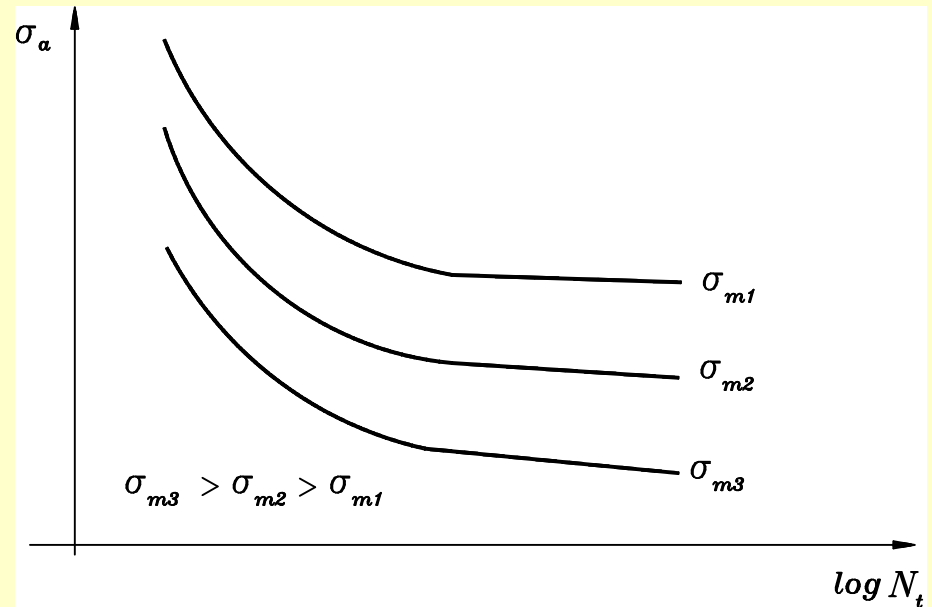
A kifáradást befolyásoló tényezők

- ⇒ a terheléstől, külső körülményektől függő tényezők
- ⇒ a darabtól függő tényezők

A terheléstől, külső körülményektől függő tényezők

A feszültségamplitudó, a közép feszültség

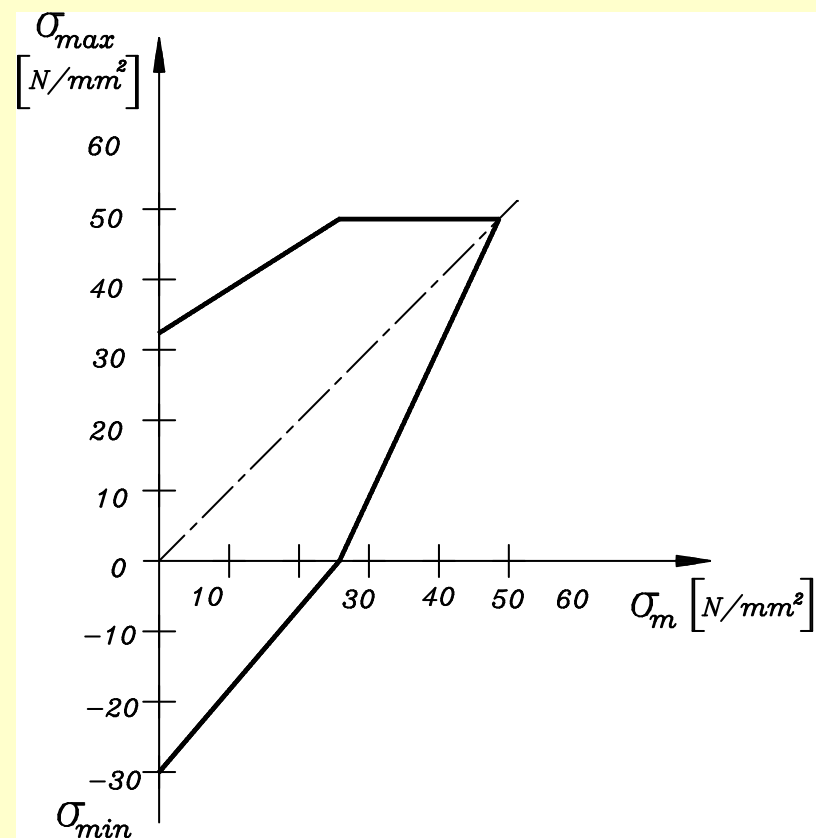
- Minél nagyobb a σ_a annál kisebb a törésig elviselt ismétlések száma. Ezek az adatok zéro közép feszültség ($\sigma_m = 0$) esetére vonatkoznak. A **közép feszültség** is befolyásolja a kifáradási élettartamot, mivel befolyásolja a görbék helyzetét

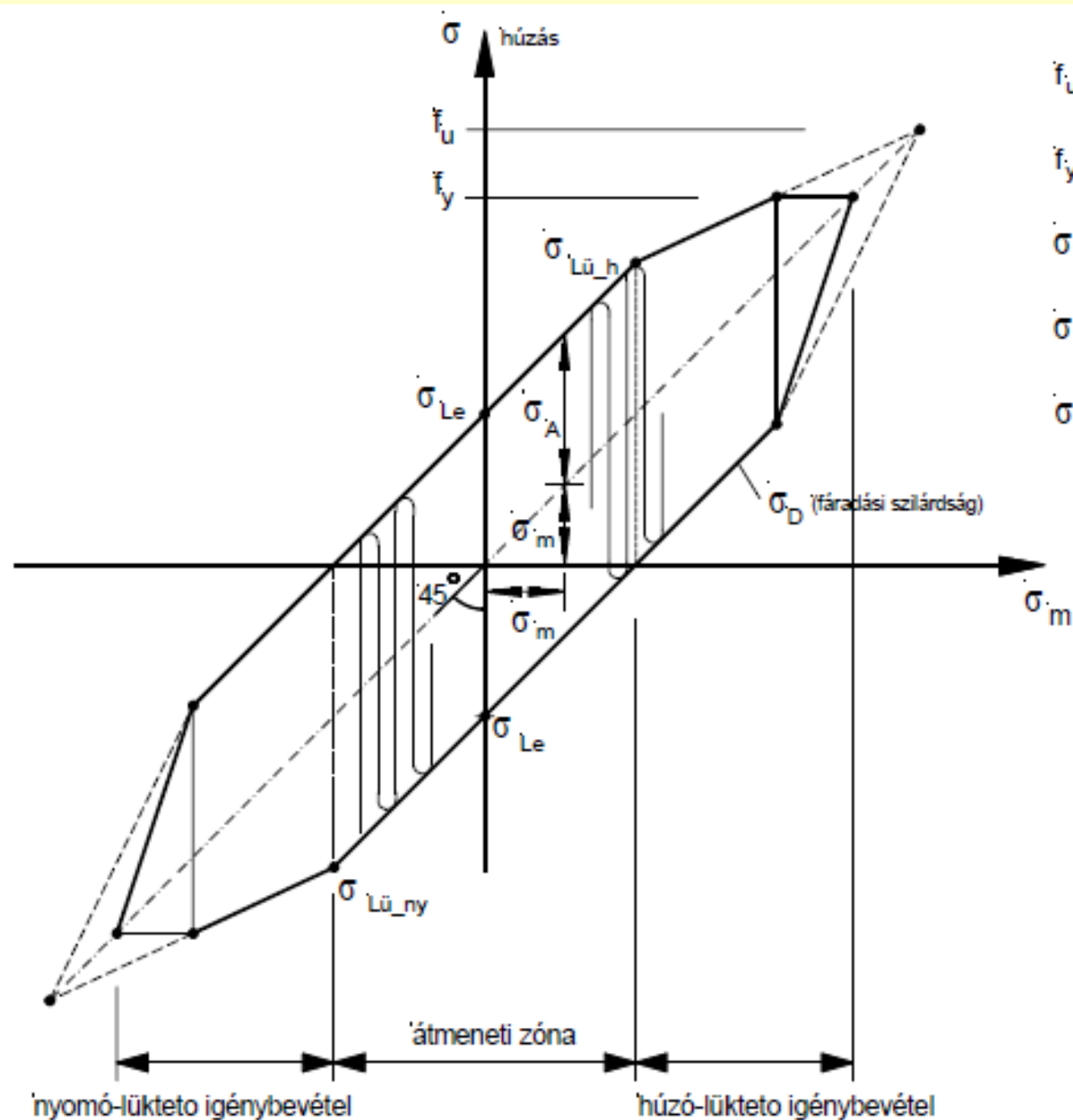


A közép feszültség hatása, biztonsági területek

Smith diagram

a közép feszültség függvényében ábrázolják a kifáradási határhoz, vagy adott számú ismétléshez (pl. 10^5) tartozó maximális és minimális feszültséget.





σ_u = szakítószilárdság

σ_y = folyáshatár

$\sigma_{Lü_h}$ = lüktetoszilárdság húzás

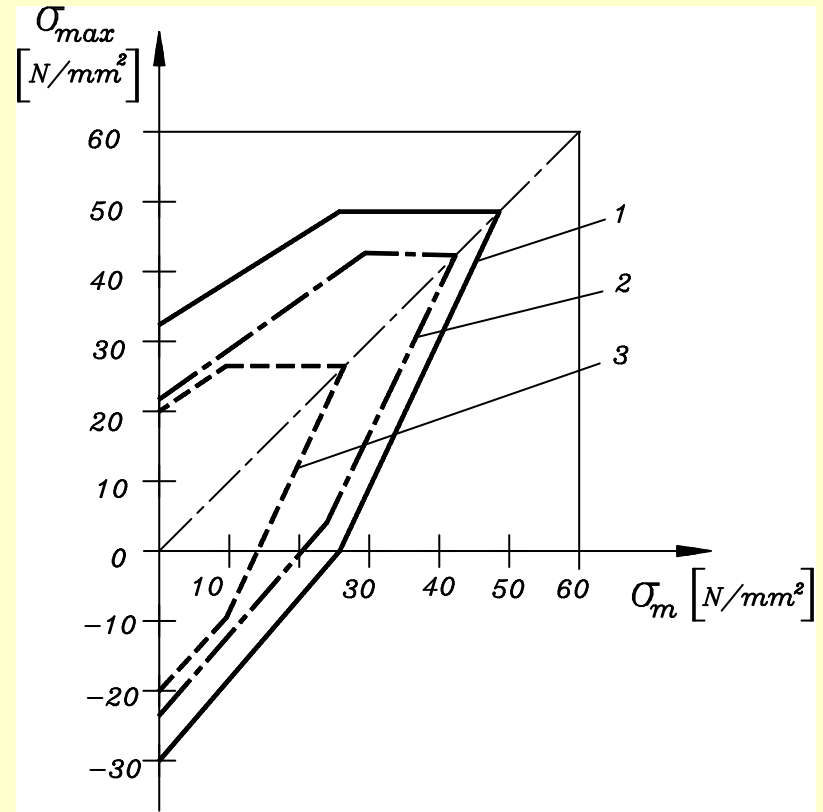
$\sigma_{Lü_ny}$ = lüktetoszilárdság nyomás

σ_{Le} = lengoszilárdság

A z igénybevétel típusának hatása

Az igénybevétel típusának
a hatása fontos, mert
jelentős eltérést
eredményez.

az anyag kifáradási határa a
legkedvezőbb váltakozó
hajlító (1), kisebb húzó-
nyomó (2) és még kisebb
váltakozó csavarás (3)
esetén..

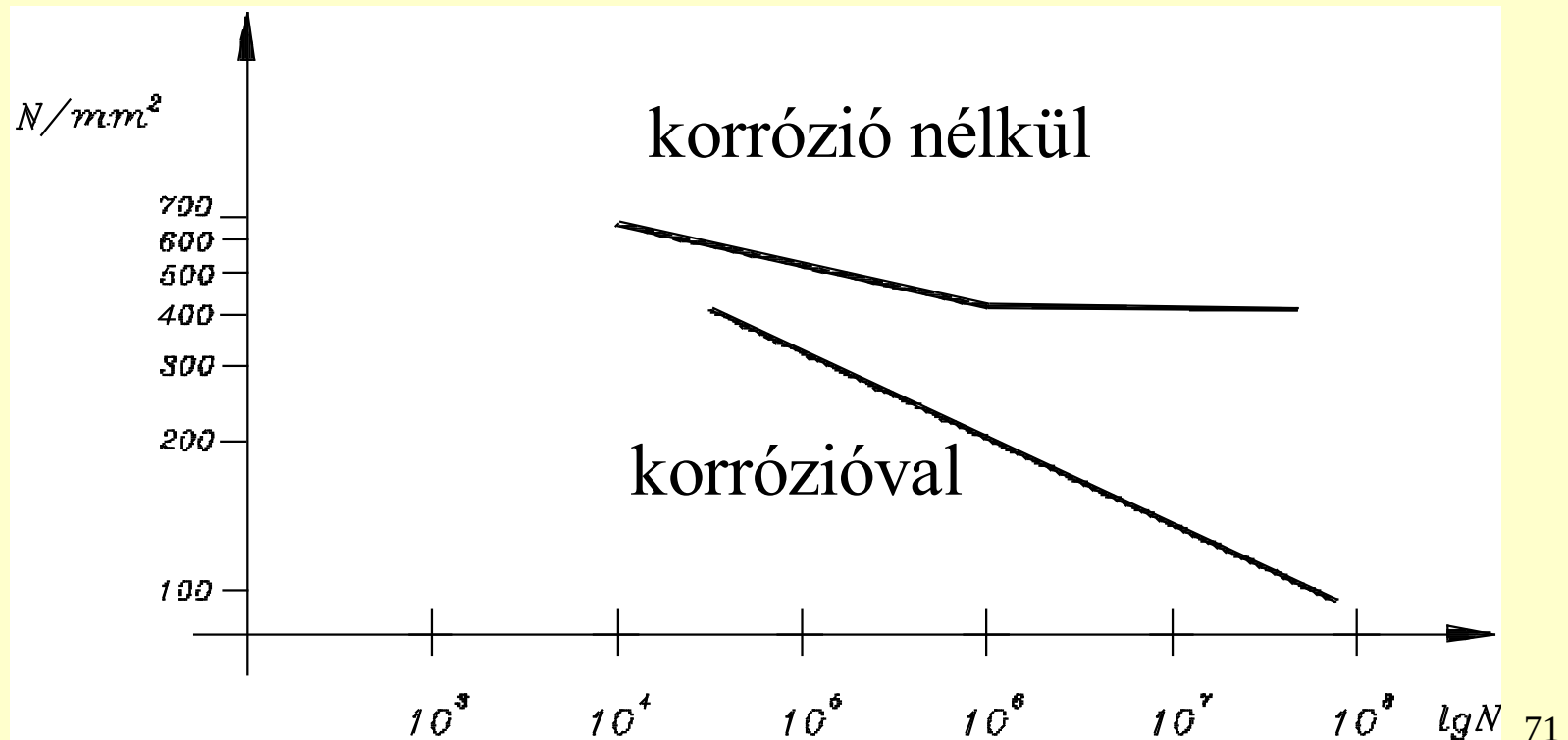


A terhelés időbeli lefolyása

- **A terhelés időbeli lefolyása** is lényeges. A különböző frekvenciával végzett mérések nem adnak azonos értékeket. pl.
acélanyagoknál 300 - 3000
igénybevétel/perc-nél nagyobb frekvencia hatására a Wöhler görbe felfelé tolódik, tehát az anyag kedvezőbben viselkedik.

Korróziós környezet

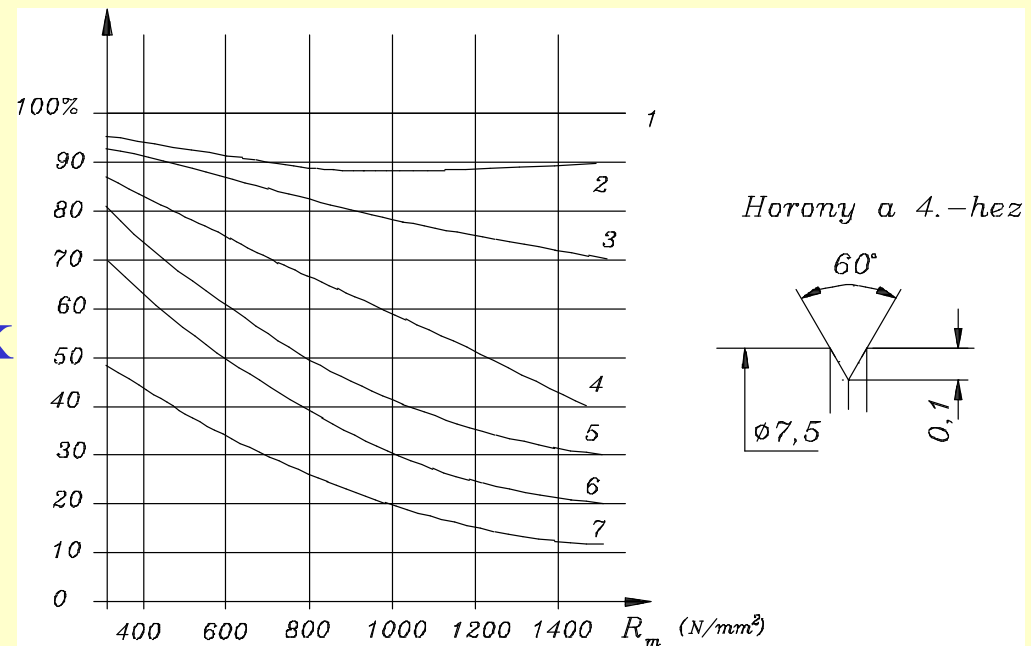
A korrozív közeg a felületet károsítja, ezért jelentősen befolyásolja a kifáradást is



A darabtól függő befolyásoló tényezők

A darab felülete

- A fáradt törés csírája a **felület**. A darab felületén lévő hibák, feszültség koncentrátorok elősegítik a darab kifáradását.
- **Fontos! A felület rontó hatása a nagyobb szilárdságú anyagoknál erőteljesebb!**



A felület hatása

- A különböző **mechanikus felületi kezelések**, amelyek a darab felületének közelében nyomófeszültséget eredményeznek pl. a felület görgőzése, szemcseszórás, sörétezés stb. a kifáradási határt növelik. Szintén jelentősen javítják a fáradási tulajdonságokat a **felületi hőkezelések** pl. a betétedzés , de különösen a nagyon vékony, kemény felületi kérget biztosító nitridálás ill. nikotrálás.

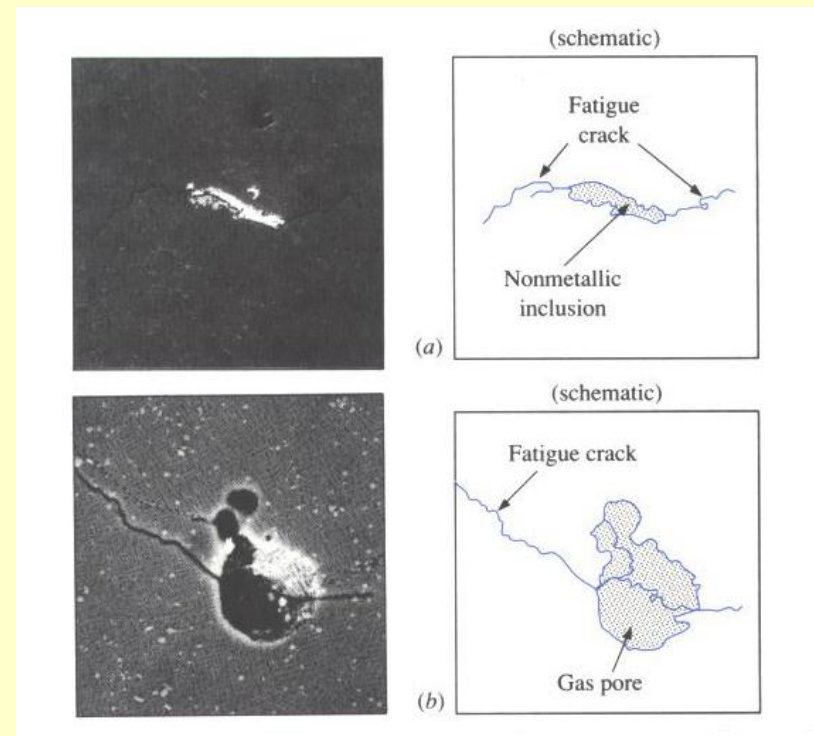
A darab mérete, alakja

- nagy darabok ellenállása mindig kisebb, mert azoknak az anyaga kevésbé "átdolgozott" képlékeny alakítással továbbá más a felület/térfogat arány és a visszamaradó feszültségek. A darab alakja a legritkább esetben sima hengeres. A bemetszések, feszültségkoncentrátorok jelentősen csökkentik a darab kifáradással szembeni ellenállását.

Az anyag mikroszerkezete

(zárványosság, szövetszerkezet)

- Homogén szerkezet pl. szferoidit (hőkezelt)
- a zárványok belső felületek lehetnek!



Szerkezetek fárasztása

- pl egy gépjármű esetében próbapályán előzetes mérésekkel felveszik a terhelési spektrumot. Az így felvett terhelés elemzése után a jellemző terheléssel fárasztják pl. az autóbusz vázszerkezetét, keresve abban a veszélyes helyeket, hogy azok módosításával az optimális élettartamot be tudják állítani.
- A szerkezet fárasztások alapján a szerkezet élettartama is meghatározható.

Példák a szerkezet fárasztásra

