

Metallerin Yorulması

İlgi alanları

- *Hedefler / Giriş*
- *Gerilme çevrimleri*
- *SN eğrisi*
- *Çevrimsel gerilme-genleme eğrisi*
- *Düşük ömürlü yorulma*
- *Yorulmanın yapısal özellikleri*
- *Yorulma çatlak ilerlemesi*
- *Yorulma özelliklerini etkileyen faktörler*
- *Yorulmaya karşı tasarım*

Hedefler

- Bu bölüm metallerde yorulmanın temellerini ve yorulma hasarının önemini gösterir.
- Yorulma özelliklerinin değerlendirilmesi için farklı yaklaşımlar, yani, yorulma SN eğrisi ve yorulma çatlak ilerlemesi direnci tanıtılacaktır.
- Metallerin yorulma özelliklerini etkileyen faktörler örneğin ortalama gerilme, gerilme konsantrasyonu, sıcaklık vb. üzerine tartışma yapılacaktır.
- Son olarak, yorulma hasarına karşı tasarım üzerinde durulacaktır.

Giriş



Bir civatanın yorulma hasarı

*Çatlak
başlangıcı*



www.corrosionlab.com



Durak çizgileri

Giriş



Tekerlek jantında yorulma hasarı



Bir mildeki iç ten oluşan korozyonun neden olduğu yorulma kırılma alanı,

Giriş

Yorulma hasarları üzerine yapılan çalışmalar yaygındır, çünkü mekanik nedenlerden dolayı tüm servis hasarlarının % 90'ını oluşturur.

Özellikleri

Metal, çekme dayanımından çok daha düşük, **tekrarlayan veya dalgalanan** gerilmeye maruz kalması sonucunda **yorulma hasarları** meydana gelir.

- Yorulma hasaları *plastik deformasyon* olmadan meydana gelir (uyarı yok).
- Yorulma kırık yüzeyi düz bir bölge olarak görünür ve *durak çizgileri* veya yorulma çatlaklarının başlangıcını gösterir.



mmd.sdsmt.edu

Karank mili kolunda hasar



www.capeis.co.uk

Bir civatada yorulma hasarı

Yorulma hasarına neden olan faktörler

Temel faktörler

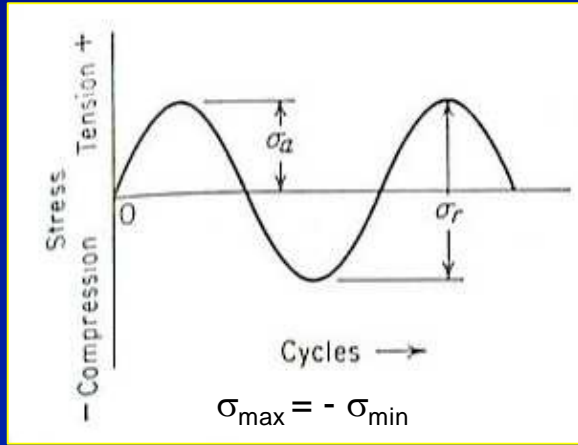
- 1) Yeterli büyüklükte çekme gerilmesi.
- 2) Uygulanan gerilmenin büyük miktarda değişiklik veya dalgalanma olması.
- 3) Uygulanan gerilmenin yeterli sayıda tekrarlanması

Ek faktörler

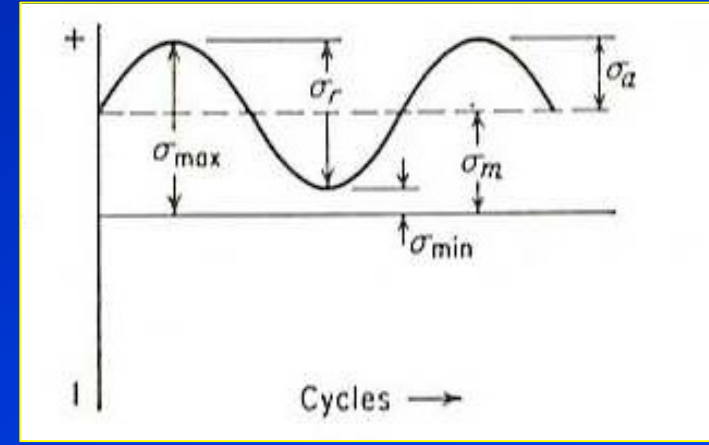
- Gerilme yığılması
- Korozyon
- Sıcaklık
- Aşırı yük
- Metalurjik yapı
- Kalıntı gerilmeler
- Birleşik gerilmeler

Gerilme Çevrimleri

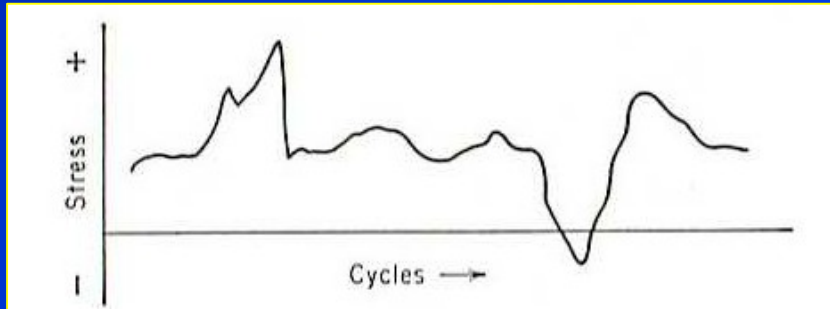
Dalgalanan/Değişken gerilme çeşitleri



(a) Tam değişken gerilme çevrimi (sinüzoidal)



(b) Tekrarlanan gerilme çevrimi

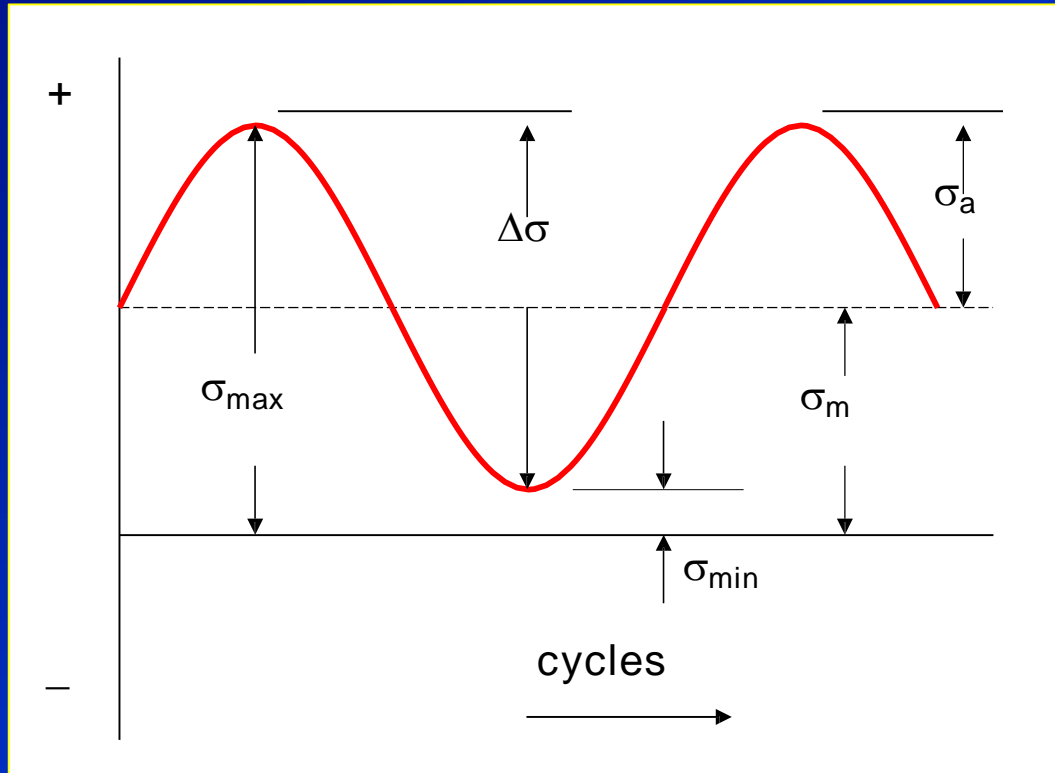


(c) Düzensiz veya rastgele gerilme çevrimi

Çekme gerilmesi +
Basma gerilmesi -

Gerilme Çevrimleri

Yorulma zorlamasında gerilme parametrelerinin adlandırılması



Yorulmada gerilme çevrimi

Maximum gerilme, σ_{max}

Minimum gerilme, σ_{min}

Gerilme aralığı

$$\Delta\sigma \text{ or } \sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad \text{Eq.1}$$

Değişken Gerilmenin Genliği

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad \text{Eq.2}$$

Ortalama Gerilme

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad \text{Eq.3}$$

Gerilme Oranı Genlik Oranı

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

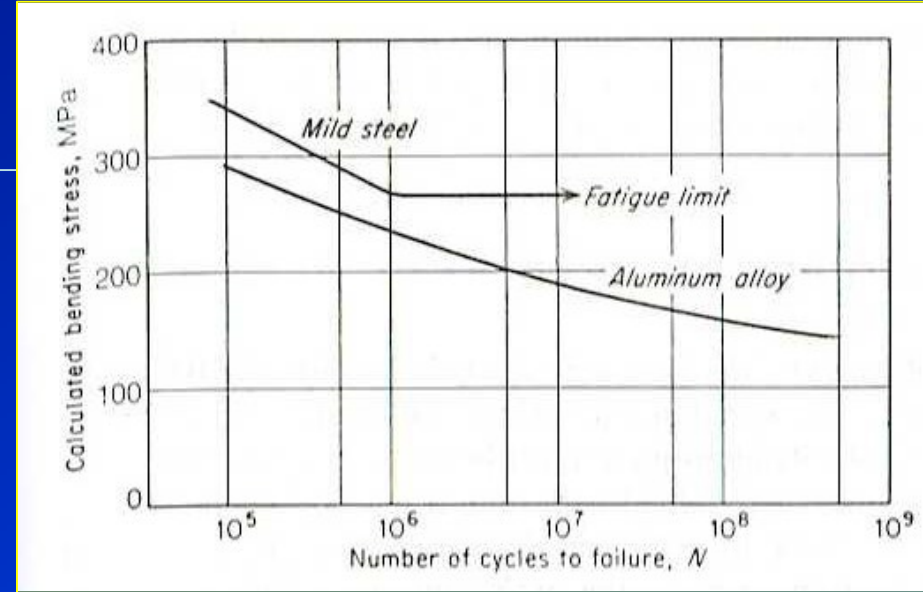
$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R}$$

Eq.4

Eq.5

S-N eğrisi

- Mühendislik yorulma verileri , normal olarak *SN eğrisi* vasıtasıyla temsil edilir. Değişken gerilmenin *S çevrim sayısı* , *N* ye göre nasıl değiştiğini gösterir.
- Gerilme σ_a , σ_{max} , σ_{min} , σ_m , *R* or *A* olabilir



Tipik yorulma eğrileri

- *S-N eğrisi* temel olarak yüksek tekrar sayılarındaki ($N > 10^5$ devir) Uzun ömürlü yorulma da denen (*HCF*) yorulma hasarı ile ilgilidir .
- $N < 10^4$ veya 10^5 çevrim sayıları kısa ömürlü yorulma (*LCF*).
- *Yorulma sınırı veya dayanıklılık sınırı* normal olarak 10^7 veya 10^8 tekrar sayısı için tanımlanır. Bu sınırın altında, malzeme muhtemelen hasara uğramadan sonsuz bir tekrar sayısına (ömre) dayanabilir.
- *Demir dışı metaller* , yani alüminyum, *yorulma sınırına* sahip değildir. Bunlarda $\sim 10^8$ çevrim sayısındaki kırılma gerilmesi yorulma dayanımı olarak tanımlanır.

Basquin denklemi

- S-N eğrisinin yüksek tekrar sayısı olan bölgesi bazen Basquin denklemi tarafından tanımlanır.

$$N\sigma_a^p = C$$

Eq.6

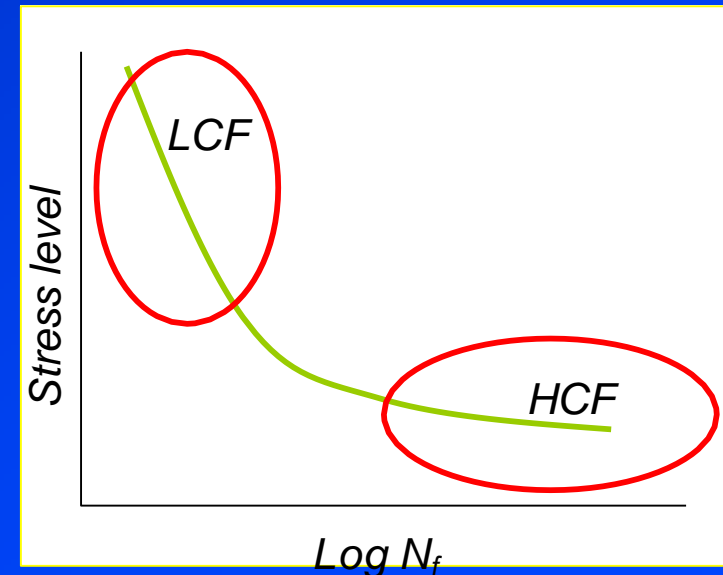
Burada σ_a Değişken gerilmenin genliğini,
 p ve C ise *amirik sabit katsayılarıdır.*

HCF

Yüksek ömürlü (düşük genleme) yorulma

LCF

Kısa Ömürlü (yüksek genleme) yorulma

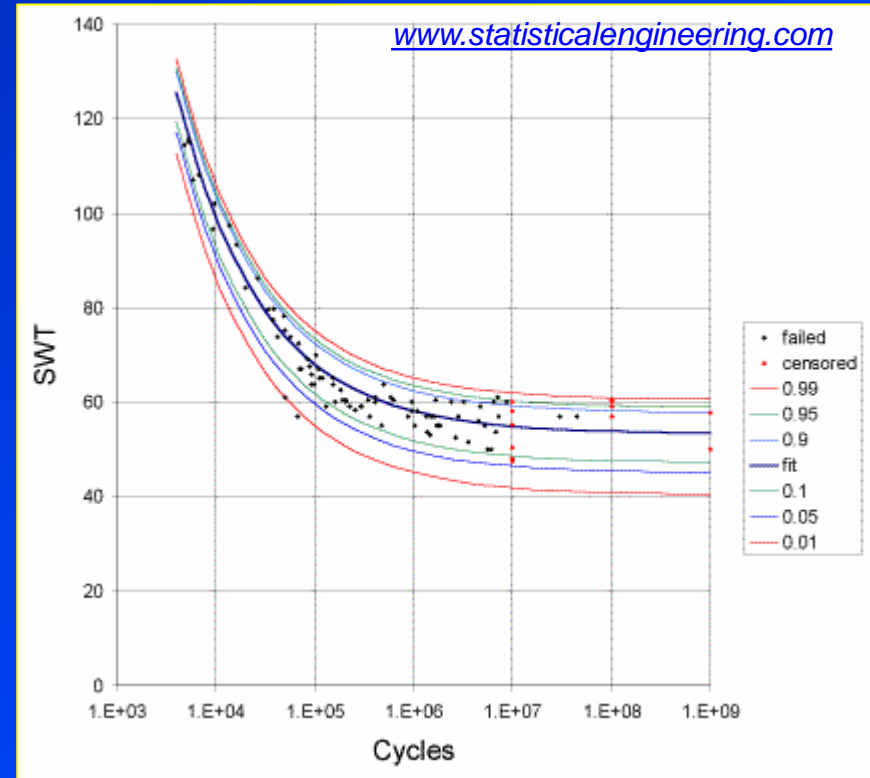


SN eğrisinin yapısı

- Bir malzemenin *SN eğrisini* elde etmek için normalde ilk önce malzemenin çekme dayanımınının $\sim 2 / 3$ 'ü gibi yüksek bir gerilme seviyesinden başlayarak $\sim 8-12$ numune üzerinde yorulma deneyi yapmak gerekir.
- Test daha sonra numunelerin artık kırılmadığı gerilme seviyesine kadar daha düşük gerilme seviyelerinde gerçekleştirilir .

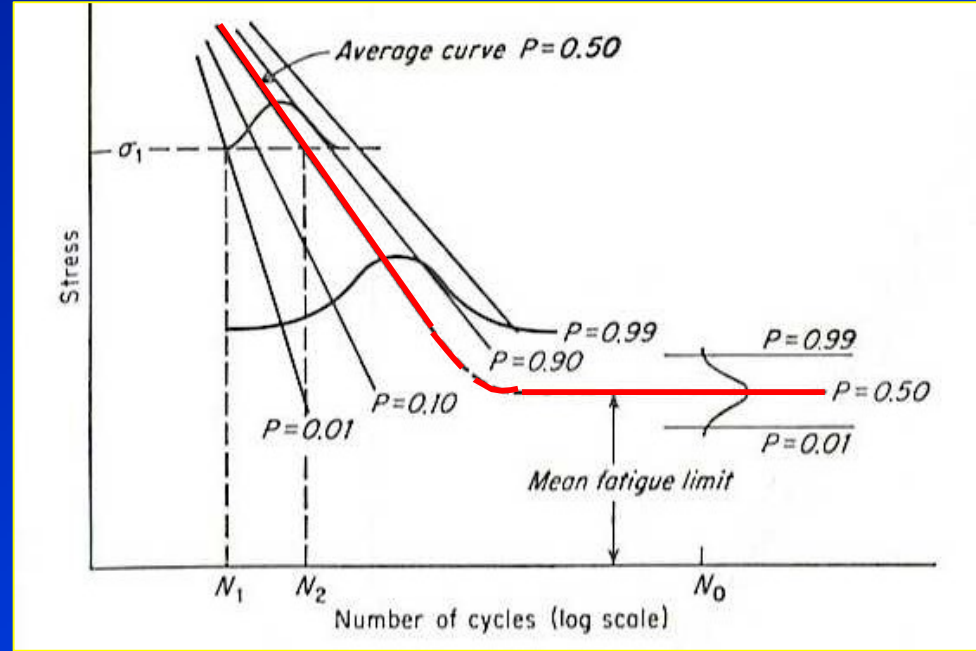
- Elde edilen veriler normal olarak aynı gerilme seviyesinde birkaç örnek kullanılarak *dağılır* .
- Bu *yorulma sınırını* tanımlamak için *istatistik yaklaşım* gerektirir

S-N yorulma eğrisi



Yorulmanın istatistiksel doğası

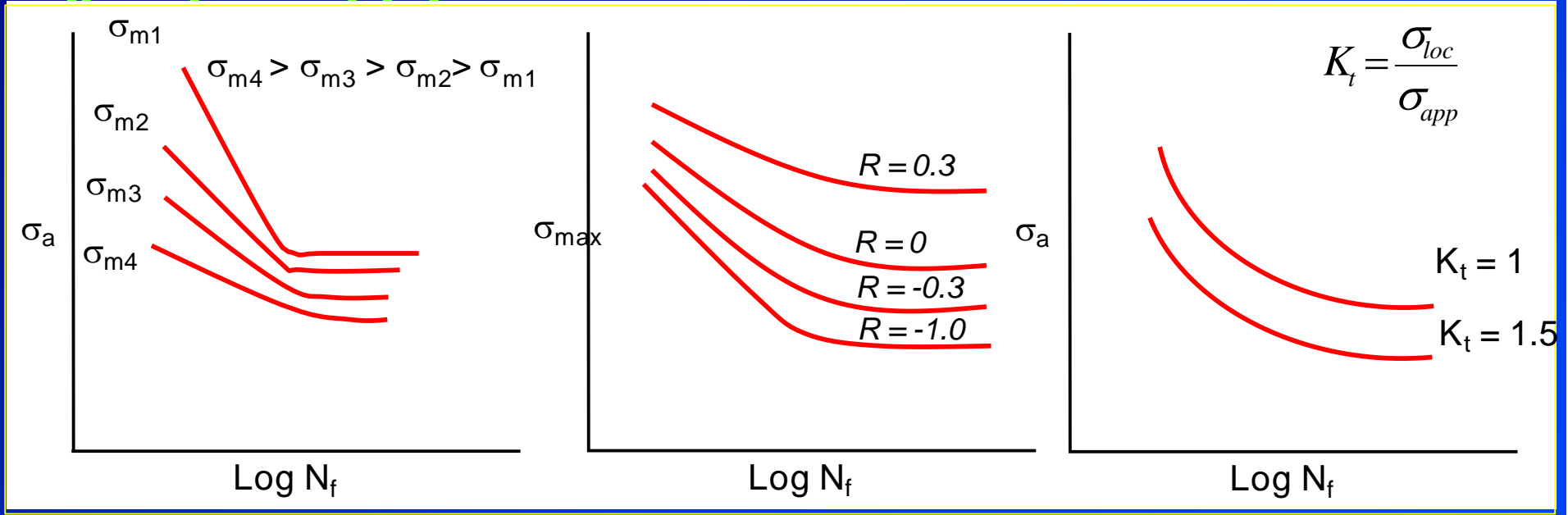
- *SN yorulma verilerinin*, normal olarak dağılmasından dolayı, bir *olasılık temeli* ile temsil edilmesi gereklidir.
- İstatistiksel parametreler elde etmek için önemli sayıda örnek kullanılır.
- σ_1 , gerilme seviyesinde numunelerin % 1'i N_1 çevrimde kırılacağı beklenir
- N_2 çevrimde numunelerin % 50'sinin kırılması beklenir .
- *mühendislik yaklaşımıyla*, $P = 0.10$ ile $P = 0.90$ hasar olasılığı bölgesinde *yorulma ömrünün logaritmik normal dağılım* olduğunu varsaymak yeteri kadar doğru sonuç vereceği öngörülebilir.



Olasılık temelinde yorulma verileri

Not: SN yorulma verileri düşük stres seviyelerinde daha dağınıktır. Her numunenin kendi yorulma sınırı vardır.

Ortalama gerilme, gerilme aralığı ve gerilme konsantrasyonu (çentik) ve SN yorulma eğrisi



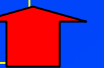
Ortalama Gerilme



Gerilme Aralığı



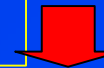
Gerilme Yoğunluğu



Yorulma Dayanımı



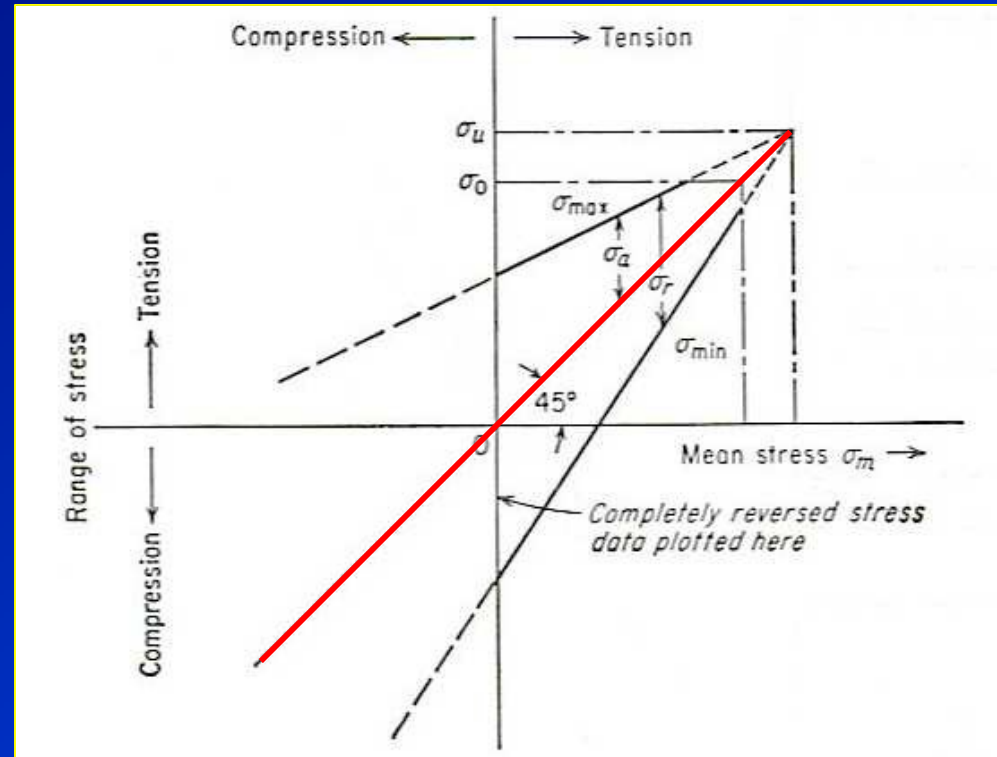
Yorulma Dayanımı



Yorulma Dayanımı



Goodman diyagramı



Goodman diyagramı

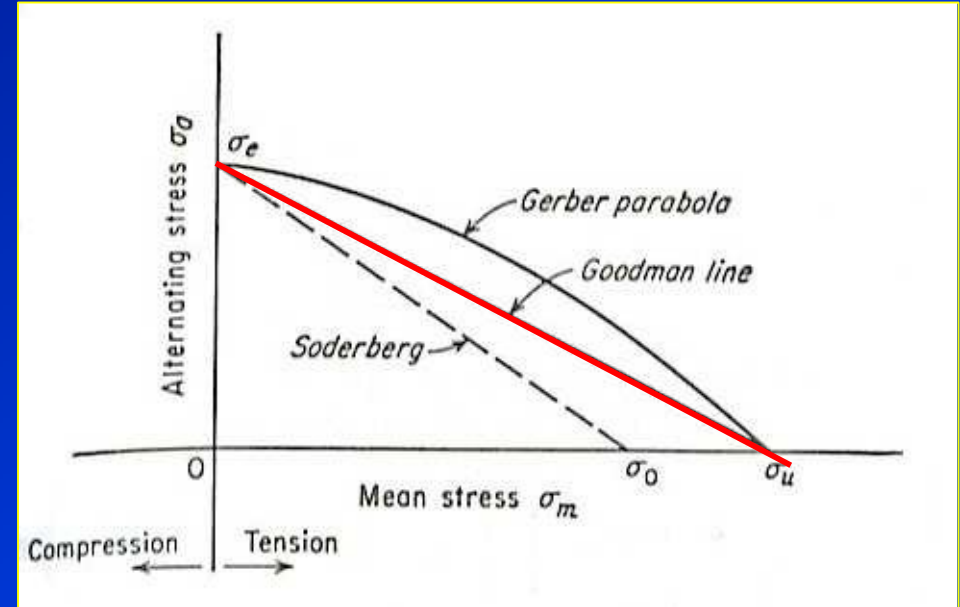
- *Goodman diyagramı* , sınır gerilme aralığının ($\sigma_{max} - \sigma_{min}$) ortalama gerilme üzerindeki etkisini gösterir .
- İzin verilen *gerilme aralığı*, azaltılırsa *ortalama gerilme* daha çekme karakterli olur
- Çekme dayanımında σ_u , gerilme aralığı sıfırdır.

Haig-Solderberg diyagramı

- **Haig-Solderberg diyagramı** değişken gerilme genliği σ_a ile ortalama gerilme σ_m nin değişimini verir.
- Goodman eğrisi şu bağıntı ile ifade edilebilir,

$$\sigma_a = \sigma_e \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^x \right]$$

Eq.7



Haig-Solderberg diagram

Burada $x = 1$ Goodman eğrisi için,
 $x = 2$ Gerber parabolü için,

σ_e = Tam alternatif yüklemdeki yorulma sınırı ($\sigma_m = 0$)

Eğer tasarım *akma dayanımına* dayanıyorsa, σ_0 , (**Solderberg eğrisi**) bu denklemde σ_0 yerine σ_u değiştirilir.

Örnek: Bir 4340 çelik çubuk, 330 kN luk maksimum çekme ve 110 kN luk minimum basma gerilmesi şeklinde değişen gerilmeye maruz bırakılıyor. Çeliğin mekanik özellikleri şu şekildedir:

$$\sigma_u = 1090 \text{ MPa}, \quad \sigma_o = 1010 \text{ MPa}, \quad \sigma_e = 510 \text{ MPa}$$

Emniyet faktörünü 2.5 alarak sonsuz ömür için çubuğun çapını belirleyiniz.

Silindirik çubuğun kesit alanı= A, olduğuna göre gerilmeler:

$$\sigma_{\max} = \frac{0.330}{A} \text{ MPa}, \quad \sigma_{\min} = -\frac{0.110}{A} \text{ MPa}$$
$$\sigma_{\text{mean}} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{0.330/A + (-0.110/A)}{2} = \frac{0.110}{A} \text{ MPa}$$
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{0.330/A - (-0.110/A)}{2} = \frac{0.220}{A} \text{ MPa}$$

Daha konservatif olan Goodman eğrisi ve Eq.7 yi kullanarak,

$$\sigma_a = \sigma_e \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right), \quad \sigma_e = \frac{510}{2.5} = 204 \text{ MPa}$$

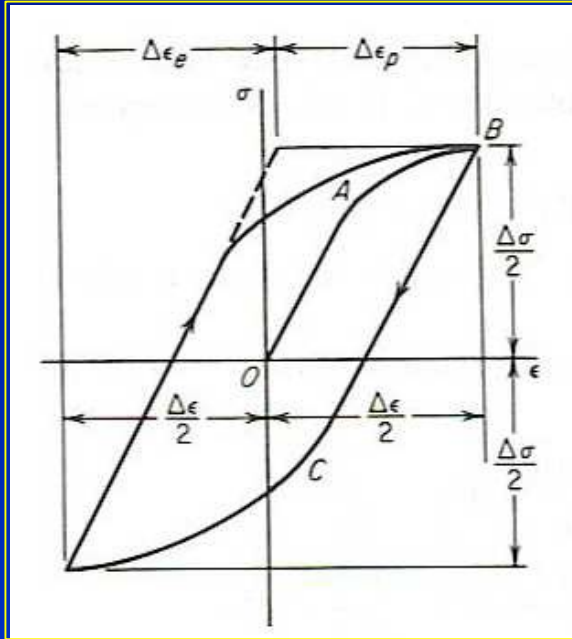
$$\frac{0.220/A}{204} = 1 - \frac{0.110/A}{1090}$$

$$A = 1179 \text{ mm}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 38.7 \text{ mm}$$

Çevrimsel Gerilme –Genleme Eğrisi

- Çevrimsel **genleme kontrollü** yorulma, genleme genliğinin çevrim boyunca sabit tutulduğunda meydana gelir.
- **termal çevrim** yapan bir parçada çalışma sıcaklığındaki dalgalanmalara cevaben oluşan genişleme ve büzölmelerde olduğu gibi sabit bir genleme alanında oluşan tersine dönen esnemeler, şöyle oluşur.



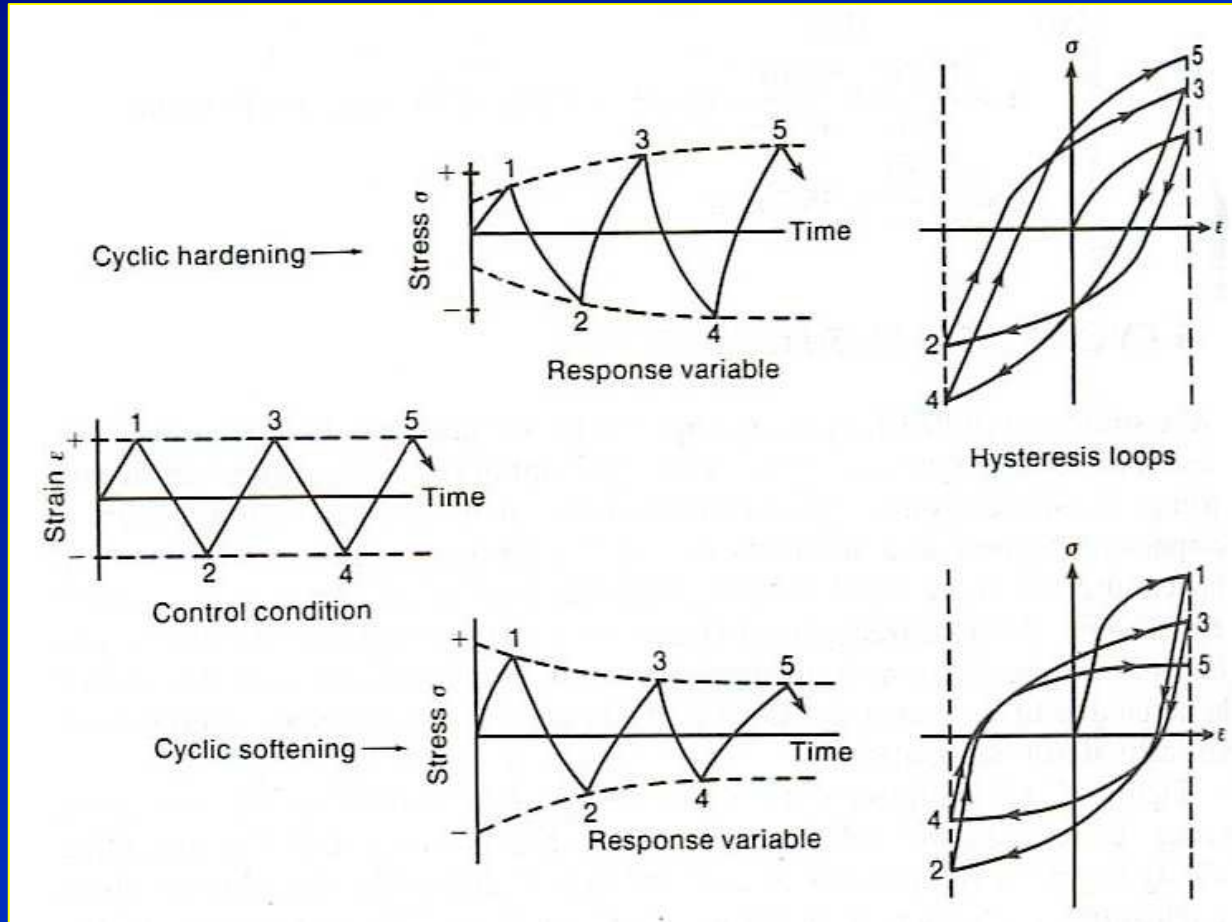
Sabit genleme çevrimi için Gerilme –Genleme histeresiz çevrimi

- İlk yükleme sırasında, gerilme-genleme eğrisi *OAB'dir* .
- *C* boyunca boşaltma işleminde basmada Akma, *Bauschinger etkisinden* dolayı düşük bir *değerde* başlar .
- Yeniden yüklenirken bir *histeresiz döngüsü* , $\Delta\epsilon$ genişliğinde ve $\Delta\sigma$ yüksekliğinde gelişir .
- *Toplam gerilme aralığı* $\Delta\epsilon$ elastik genleme bileşeni artı plastik genleme bileşeninden oluşur.

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p$$

Eq.8

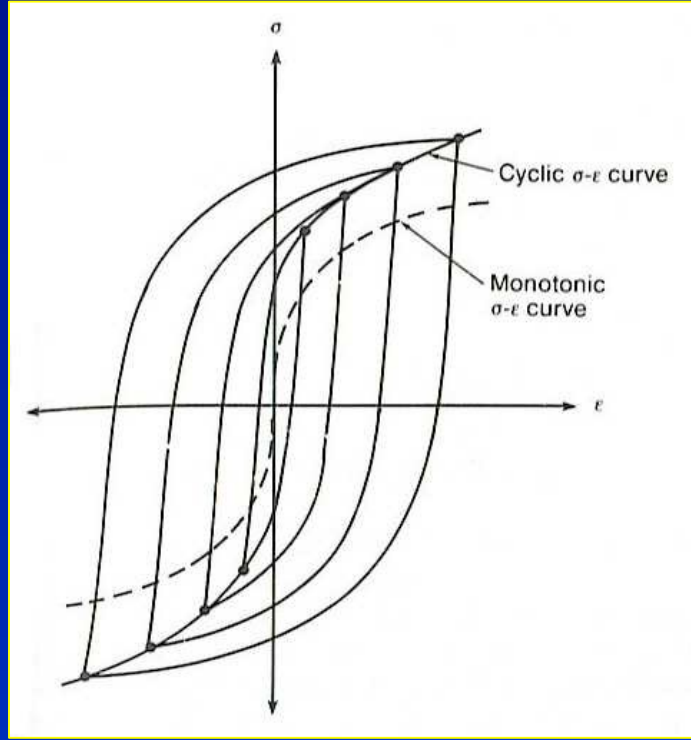
Çevrimsel Sertleşme ve Çevrimsel Yumuşama



• Çevrimsel Sertleşme-(Cyclic hardening) artan tekrar sayısı ile birlikte parçaya etkiyen gerilmenin sürekli artması ile oluşur. ($n > 0.15$)

• Çevrimsel Yumuşama-(Cyclic softening) sürekli azalan bir gerilme aralığına ve erken kırılmaya yol açacaktır. ($n < 0.15$)

Çevrimsel sertleşen malzemelerin monotonik ve çevrimsel gerilme-genleme eğrilerinin karşılaştırılması



Monotonik ve döngüsel gerilme-genleme eğrileri

- Çevrimsel gerilme-genleme eğrisi üstel bir fonksiyon olarak şöyle tanımlanabilir,

$$\Delta\sigma = K' (\Delta\varepsilon_p)^n \quad \text{Eq.9}$$

Burada n' çevrimsel gerilme-genleme pekleşme üstelidir

K' ise çevrimsel dayanım katsayısıdır

O halde
Genleme genliği

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$$
$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\sigma}{K'} \right)^{1/n'}$$

Metaller için n' 0.10 -0.20 arasında değişir

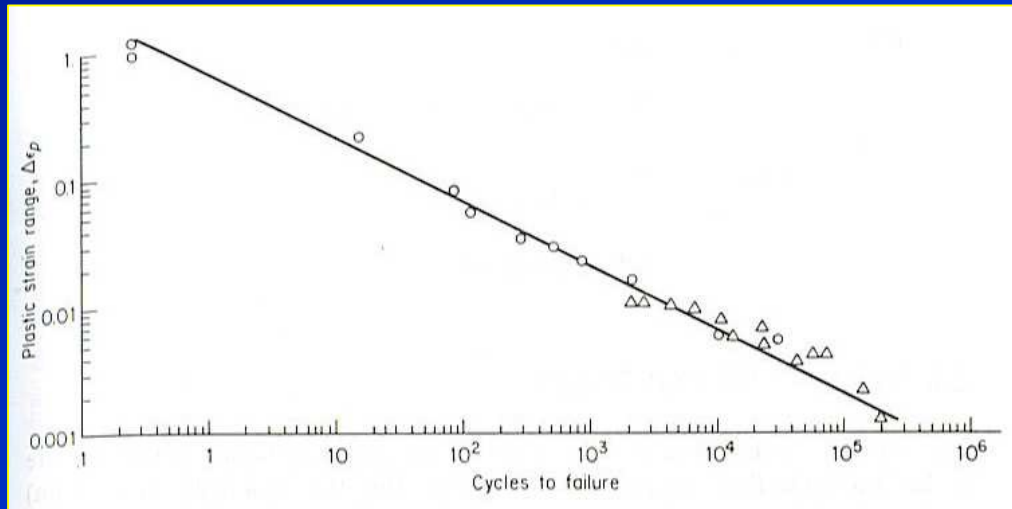
Düşük Ömürlü Yorulma

Low cycle fatigue (LCF) (yüksek genleme) görece **yüksek gerilme** seviyesinde ve **düşük tekrar sayılarında** meydana gelen yorulma hasarıyla ilgilidir .

Örn: nükleer basınçlı kaplarda, buhar türbinlerinde ve güç makinelerinde. Genellikle **çevrimsel gerilmeden** ziyade **çevrimsel genleme** ile ilgilidir.

- **LCF** verileri normal olarak N 'e karşı genleme alanı $\Delta\varepsilon_p$ 'ın değişimi olarak sunulur

- Eniyi Log-log skalada gösterilen bu ilişki (**Coffin-Manson**)



Düşük Ömürlü Yorulma Eğrisi ($\Delta\varepsilon_p - N$).

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N)^c$$

Eq.10

Burada

$\Delta\varepsilon_p/2$ = plastik genleme genliği

ε'_f = Yorulma Süneklik katsayısı

$2N$ = hasara neden olan çevrim sayısı.

c = yorulma süneklik üsteli 0.5 ile -0.7 arasında değişir.

Örnek: Çevrimsel gerilme –genleme eğrisi için, $\sigma_B = 75$ MPa ve $\varepsilon_B = 0.000645$. Eğer $\varepsilon_f = 0.30$ ve $E = 22 \times 10^4$ Mpa ise.

Belirleyiniz

(a) $\Delta\varepsilon_e$ ve $\Delta\varepsilon_p$

$$\Delta\varepsilon_e = \frac{\Delta\sigma}{E} = \frac{2(75)}{22 \times 10^4} = 6.818 \times 10^{-4}$$

$$\Delta\varepsilon_p = \Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon_e = (2 \times 0.000645) - 0.0006818 = 6.082 \times 10^{-4}$$

(b) Hasar tekrar sayısı.

Coffin-Manson ilişkisinden

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f' (2N)^c$$

Eğer $c = -0.6$ ve $\varepsilon_f \sim \varepsilon_f'$

$$\frac{6.082 \times 10^{-4}}{2} = 0.30(2N)^{-0.6}$$
$$N = 49,000 \text{ çevrim}$$

Genleme-Ömür Denklemi

- Nominal Genlemelerin elastik olduğu **Yüksek Ömürlü yorulma**(*düşük genleme*) *high-cycle fatigue* (**HCF**) rejimi için, *Basquin's denklemi* şu şekilde yazılabilir

$$\sigma_a = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} E = \sigma'_f (2N)^b$$

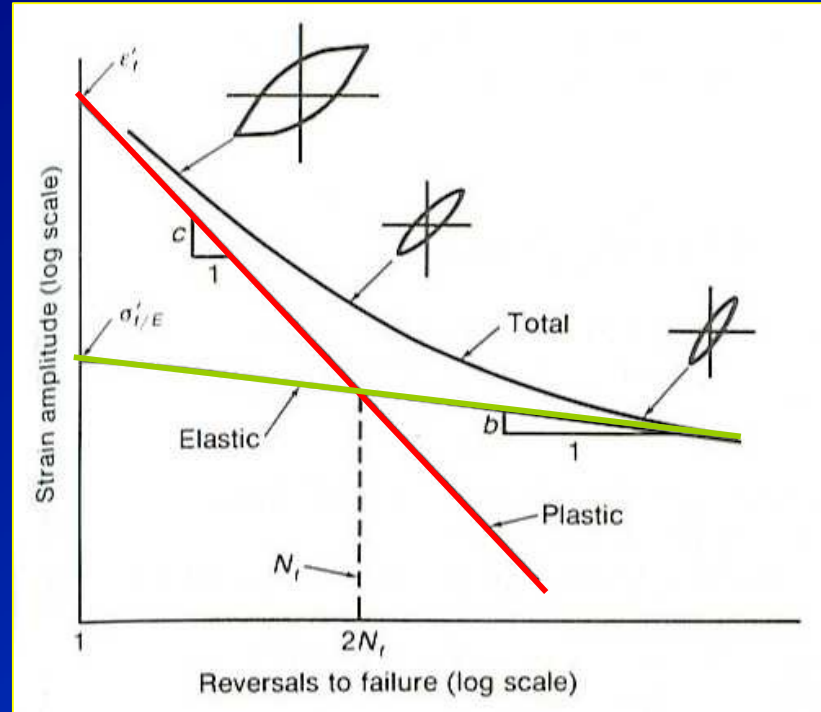
Eq.11

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2}$$

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c$$

- Burada
- σ_a = değişken gerilme genliği
 - $\Delta \varepsilon_e / 2$ = elastik genleme genliği
 - E = Elastiklik Modülü
 - σ'_f = $2N=1$ deki gerilme olarak tanımlanan yorulma dayanım katsayısı.
 - $2N$ = hasara neden olan çevrim tekrar sayısı
 - b = yorulma dayanım üsteli –çoğu metal için 0.05 ile -0.12 arasında değişir.

Yorulma Genleme-Ömür Eğrisi



Sünek Malzemeler

➔ Yüksek çevrimsel genleme durumu

Yüksek Dayanımlı Malzemeler

➔ Düşük çevrimsel genleme durumu

Bu dönüşümün olduğu yorulma ömür değeri

$$2N_f = \left(\frac{\epsilon'_f E}{\sigma'_f} \right)^{1/(b-c)}$$

Eq.12

Yorulma Genleme-Ömür Eğrisi

- büyük toplam genleme genliklerinde, plastik eğriye yaklaşır
- küçük toplam genleme genliklerinde, elastik eğriye doğru yaklaşır.

Yorulmayı Etkileyen İyapısal zellikler

Yorulma hasarı aŐağıdaki süreçlerin arka arkaya oluŐmasıyla meydana gelir;

Çatlak başlangıcı: yorulma hasarının erken geliŐimi (uygun bir termal tavlama ile giderilebilir).

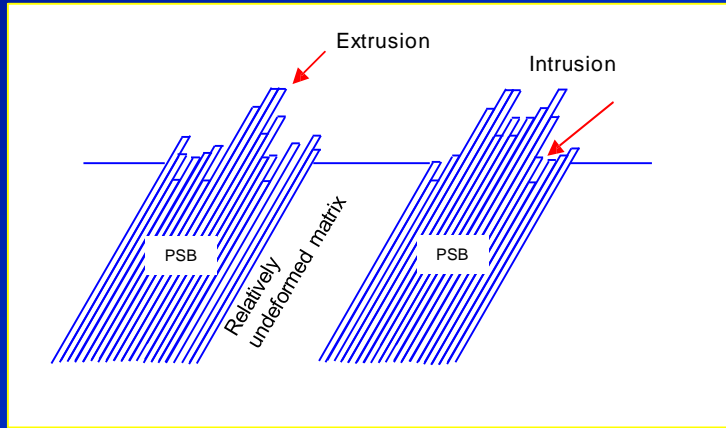
Kayma bandı çatlak büyümesi: yüksek kayma gerilmesi etkiyen düzlemde baŐlangıç atlağıının derinleŐmesi (I aşama çatlak büyümesi)

Yüksek ekme gerilmeli düzlemlerde çatlak büyümesi: maksimum çekme gerilmesinin normali yönünde iyi tanımlanmıŐ atlağıın büyümesi

Nihai sünek kırılma: Çatlak yeterli uzunluğa ulaŐtıđında kalan kesit uygulanan yükü taŐıyamayınca meydana gelir,

Yorulma çatlağı oluşumu ve kayma bantlarından çatlak büyümesinin başlatılması (aşama I)

- **Yorulma çatlakları** normal olarak serbest bir yüzeyden başlar. Yorulma zorlamasının ilk birkaç binlik gerilme çevrimi sırasında yüzeyde kayma çizgileri oluşur.
- Yorulma zorlamalar altında ince kayma bantlarının ileri ve geri hareketler yüzeyde çentikler veya çıkıntılar oluşturabilir. Bunlar **gerilme yükseltici** olarak etki ederek **çatlak** oluşturabilirler.

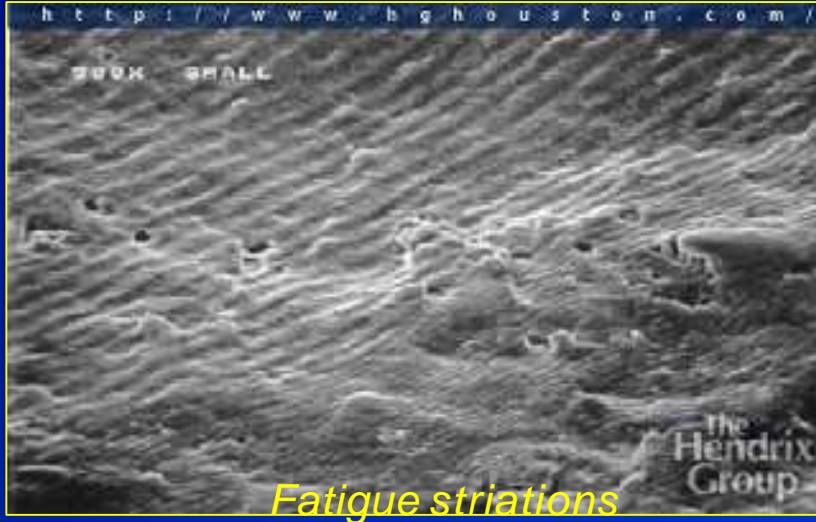


Yorulma yüklemesi sırasında oluşan çevrimsel kaymanın neden olduğu çıkıntı ve girintilerle yorulma başlatma modeli.

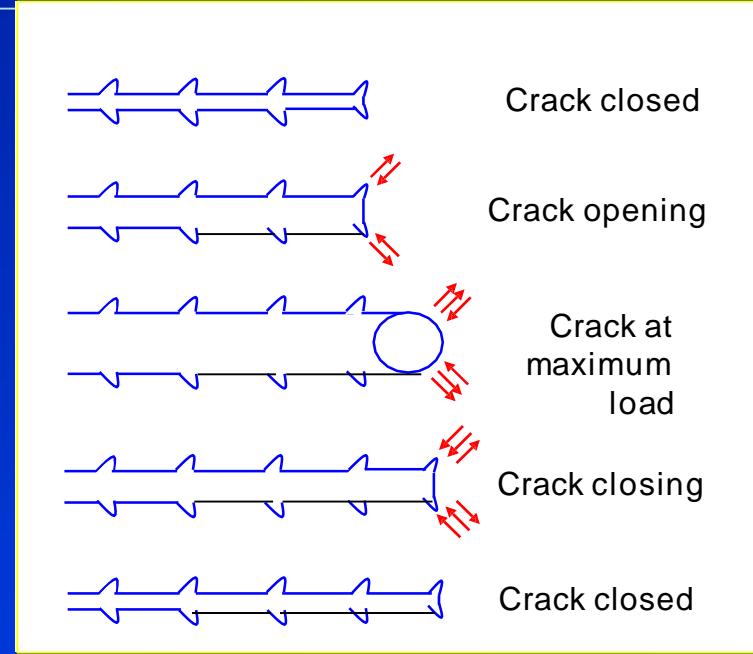
• **Aşama I'de**, yorulma çatlağı başlangıçta kayma düzlemleri boyunca ilerleme eğilimindedir (kalıcı kayma bantlarının çıkması ve girmesi) ve daha sonra maksimum çekme gerilmesine normal yönde ilerler (aşama II) .

• **Aşama I'deki** çatlak ilerleme hızı genellikle, özelliiksiz bir yüzey verecek tarzda ve $nm / devir$ seviyesinde çok düşüktür.

Stable crack growth (stage II)



- Aşama II de çatlak ilerlemesinin meydana geldiği kırılma yüzeyi, sık sık bir dalgalanma deseni veya yorulma çizgileri gösterir (*fatigue striations*).
- Her bir çizgi tek bir gerilme çevrimi ile üretilir ve en büyük çekme gerilmesine dik olarak ilerleyen bir çatlak cephesinin ardışık konumunu temsil eder.




Yorulma çizgilerinin oluşumu

- Çatlak ucunun körlenmesi 45° 'de etkiyen çekme yükü etkisiyle meydana gelir ve çatlak plastik kayma ile daha uzar.
- Basma yükü, kayma yönünü tersine çevirir ve çatlak yüzeyini kırarak çatlak ucunu yeniden keskinleştirir.

Yorulma Çatlağı İlerlemesi

Yorulma çatlak ilerlemesi

- Aşama I İlerlemeyen yorulma çatlağı (~0.25nm/çevrim)
- Aşama II Kararlı yorulma çatlak ilerlemesi- geniş çalışılmış
- Aşama III Kararsız yorulma çatlak ilerlemesi  Hasar

•Yorulma hasarına karşı tasarım için, II. Aşamada Paris/Erdoğan rejiminde yorulma çatlağı büyüme hızını izlemek için kırılma mekaniği kullanılmaktadır.

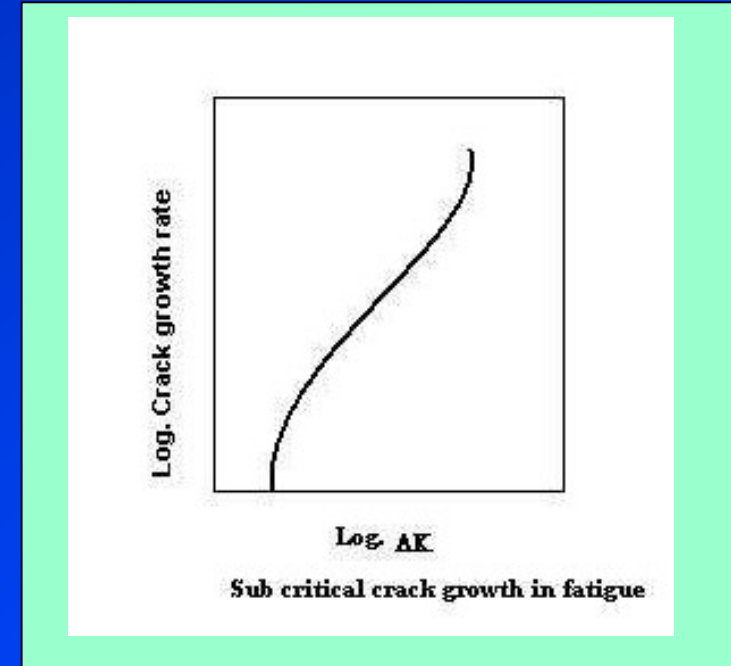
Eq.13

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

•Burada yorulma çatlağı büyüme hızı da/dN , gerilme aralığı $\Delta\sigma$ ve çatlak boyu a 'nın fonksiyonu olan gerilme şiddeti faktörü aralığı ΔK ile değişir

Eq.14

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$
$$\Delta K = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} - \sigma_{\min} \sqrt{\pi a}$$




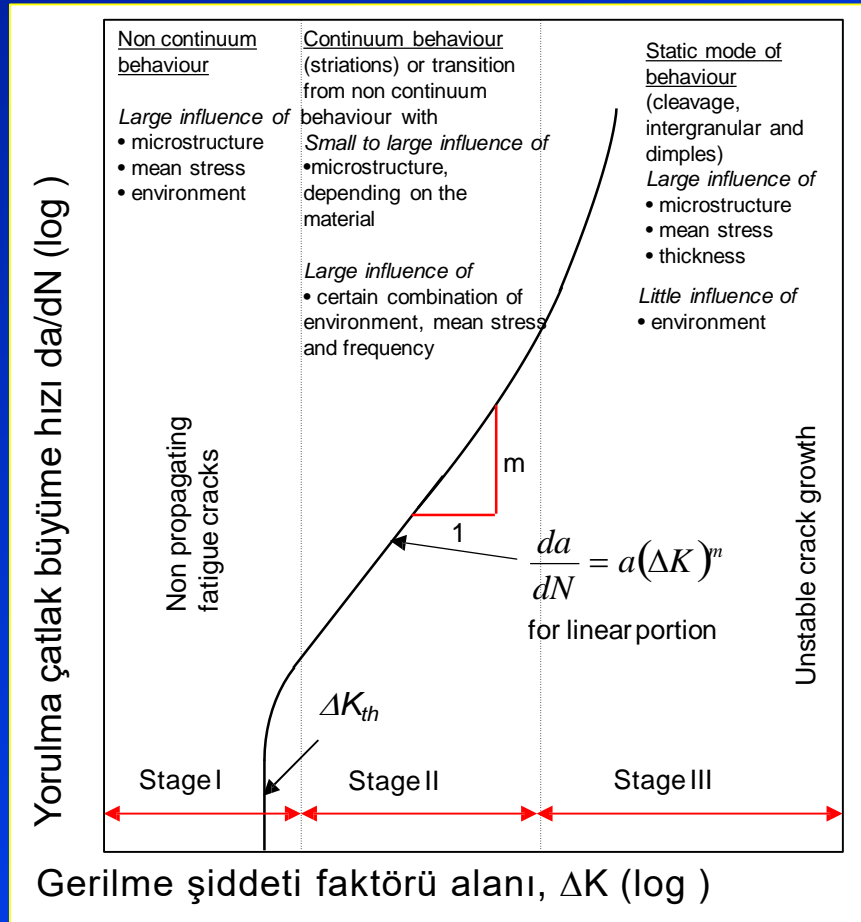
FCG curve

Log-Log ekseninde çizilen bir grafik Paris -Erdoğan üsteli m yi eğim olarak gösterir.

Yorulma Çatlağı İlerlemesi

Yorulma çatlak ilerlemesi

- Aşama I** İlerlemeyen yorulma çatlağı (~0.25nm/cycle)
Aşama II Kararlı yorulma çatlak ilerlemesi- geniş çalışılmış
Aşama III Kararsız yorulma çatlak ilerlemesi  Hasar



Yorulma çatlağı büyüme davranışı

II. Aşama'da yorulma çatlağının ilerlemesi

Aşama II daki yorulma çatlağı büyüme davranışı, yorulma çatlak büyüme ömrünü temsil eden kararlı yorulma çatlak büyüme hızını belirlemek için yaygın olarak araştırılmıştır.

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

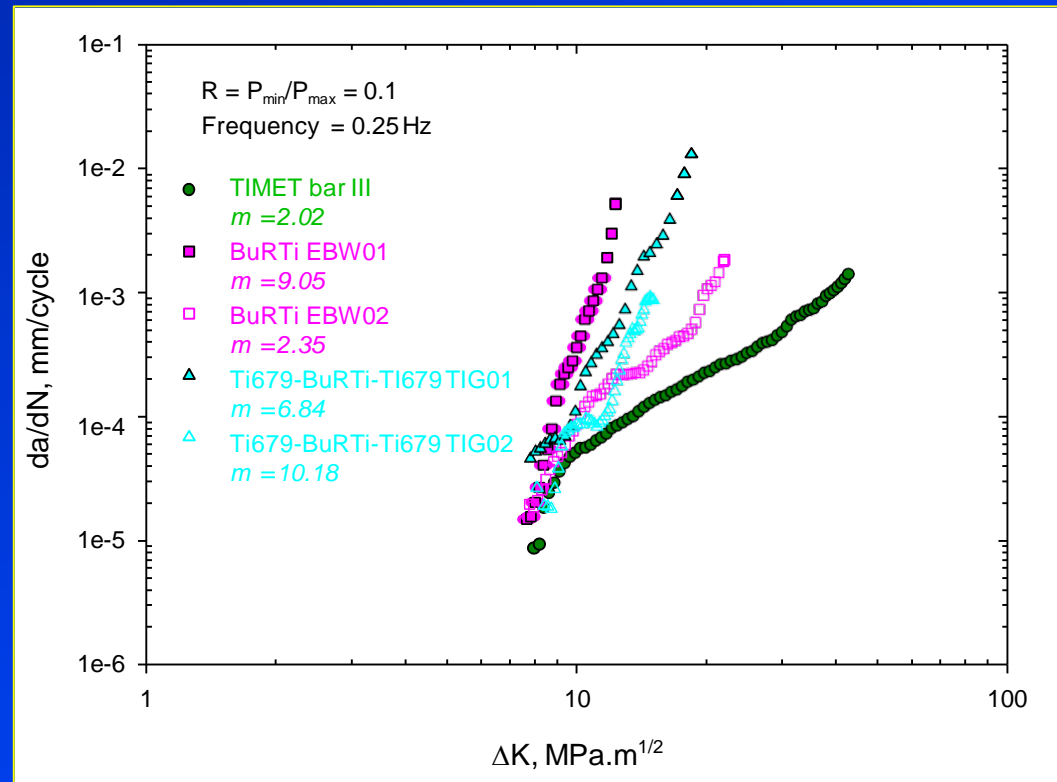
$$da/dN$$

Yorulma çatlağının ilerleme
Ömrü N (aşama II)
şu şekilde belirlenebilir

$$N_f = \int_0^{N_f} dN$$
$$N_f = \frac{a_f^{-(m/2)+1} - a_i^{-(m/2)+1}}{(-(m/2)+1)A\sigma_r^m \pi^{m/2} \alpha^m} \quad \text{Eq.15}$$

burada $m \neq 2$

α : çatlak geometrisi faktörü



Ana ve kaynak metalinde çatlak büyüme hızı

Örnek: Yumuşak çelikten bir plaka $\sigma_{max} = 180$ MPa ile $\sigma_{min} = -40$ Mpa arasında değişen sabit genlikli yorulma yüküne maruz bırakılıyor Çeliğin statik özellikleri $\sigma_o = 500$ MPa, $\sigma_u = 600$ MPa, $E = 207$ MPa, and $K_c = 100$ MPa.m^{1/2}. şeklindedir. Eğer plaka başlangıçta 0.5 mm'lik bir kenarı çatlağı içeriyorsa, levhayı kırmak için kaç yorulma çevrimin uygulanması gerekecektir?

Yüzey çatlağı için, $\alpha = 1.12$, ve ferritik-perlitik çelik için, $A = 6.9 \times 10^{-12}$ MPam^{1/2} ve $m = 3.0$.

$r = (180-0)$, çünkü basma gerilmesi ihmal edilebilir ve ortalama gerilmenin çatlak büyümesi üzerindeki etkisini ihmal edersek

$$a_i = 0.0005 \text{ m}, a_f = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{\sigma_{max} \alpha} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{100}{180 \times 1.12} \right)^2 = 0.078 \text{ m}$$

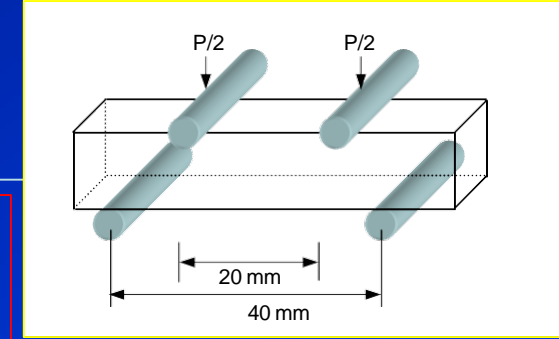
Eq.15 den

$$N_f = \frac{a_f^{-(m/2)+1} - a_i^{-(m/2)+1}}{(-(m/2)+1)A\sigma_r^m \pi^{m/2} \alpha^m}$$

$$N_f = \frac{(0.078)^{-(3/2)+1} - (0.0005)^{-(3/2)+1}}{(-(3/2)+1)(6.9 \times 10^{-12})(180)^3 (\pi)^{3/2} (1.12)^3} = 261,000 \text{ çevrim}$$

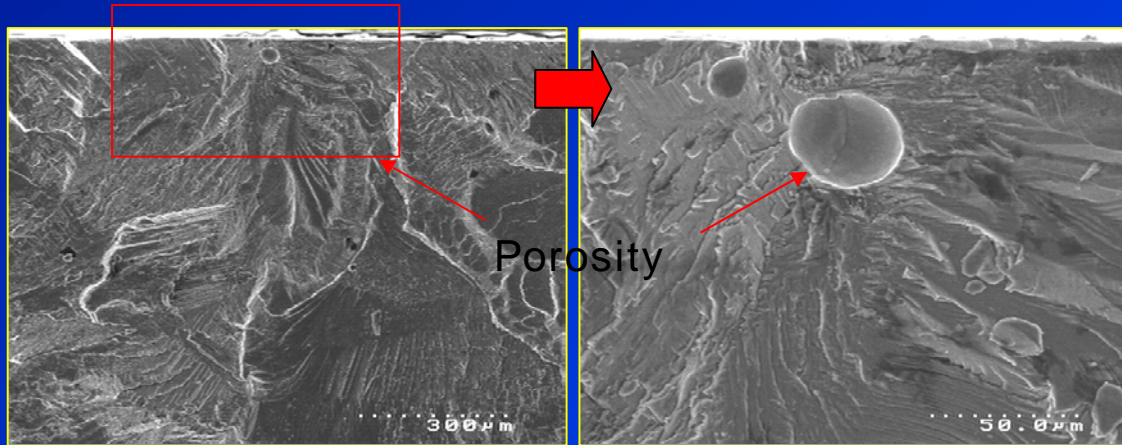
S-N eğrisi ve kırık yüzeyler

- **S-N eğrisi testi**, çatlak başlangıcını ve çatlak ilerleme aşamasını içerir.
- Yorulma testi normal olarak çekme veya eğilme altında farklı numune yüzey koşullarından, yani parlatılmış, taşlanmış, işlenmiş vs. gibi düz numuneler kullanır.
- Çatlak başlangıcı, inkülizyonlar, ikinci fazlar, gözeneklilik, kusurlar nedeniyle olabilir.



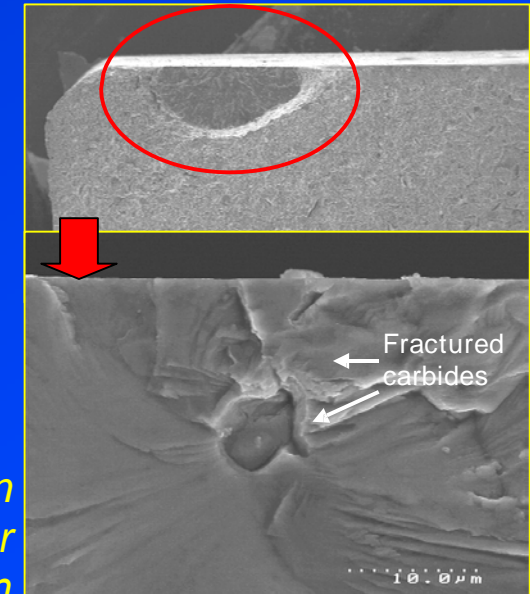
Çatlak uzunluğu

Köşe çatlağı



Prorositeden kaynaklı çatlak başlangıçları

Finkülizyon beya bir parçacıktan kaynaklanan



High nominal stress

Low nominal stress

No stress concentration

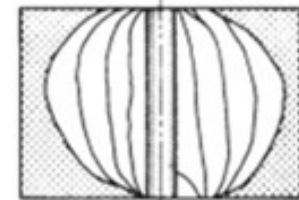
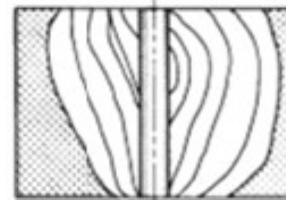
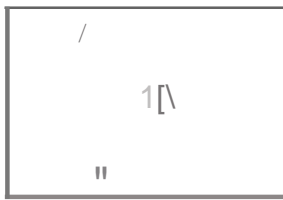
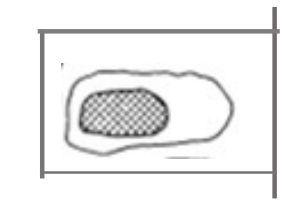
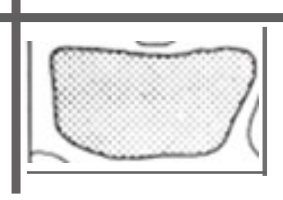
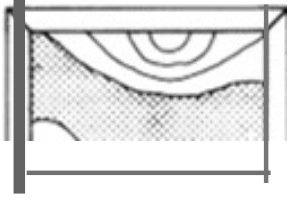
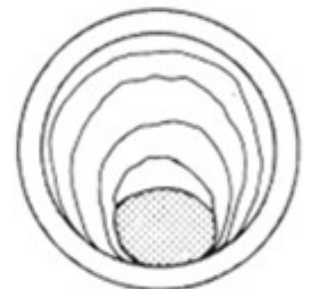
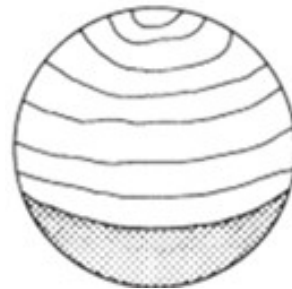
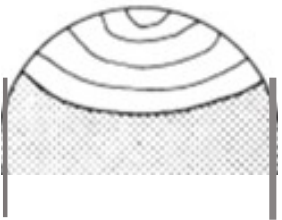
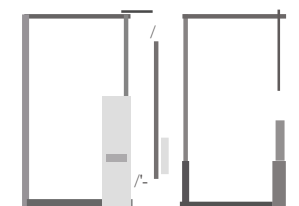
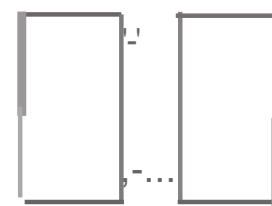
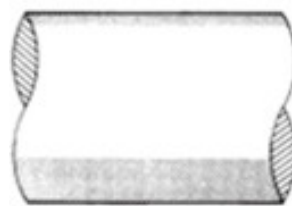
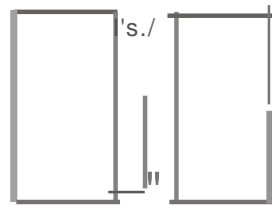
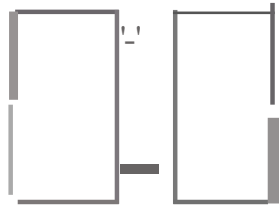
Mild stress concentration

Severe stress concentration

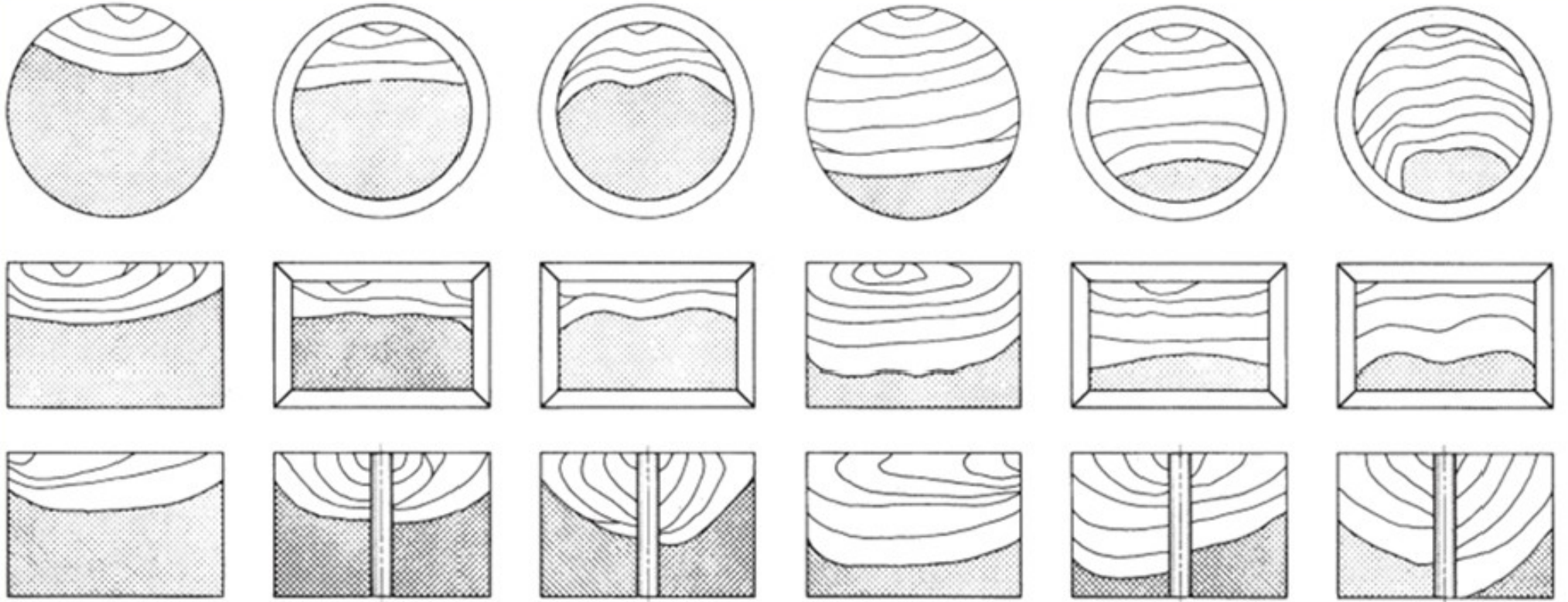
No stress concentration

Mild stress concentration

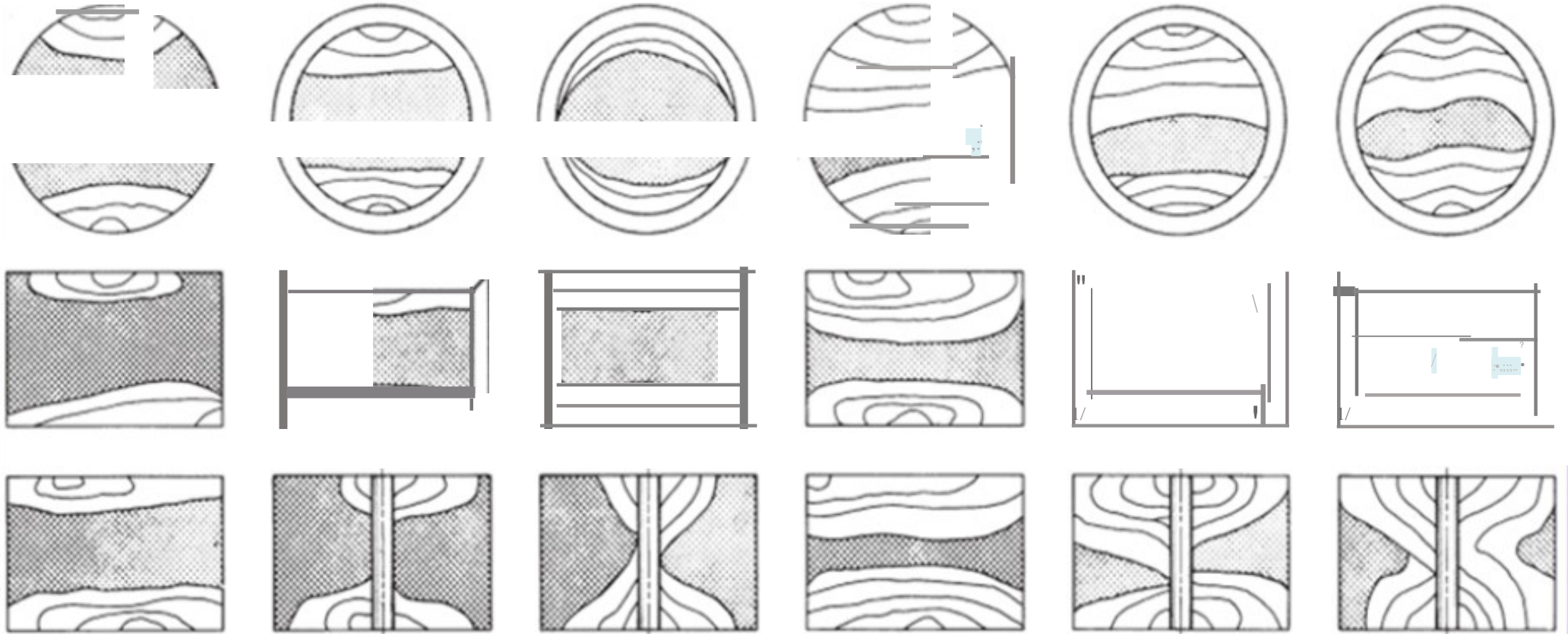
Severe stress concentration



Çekme-çekme veya çekme basma

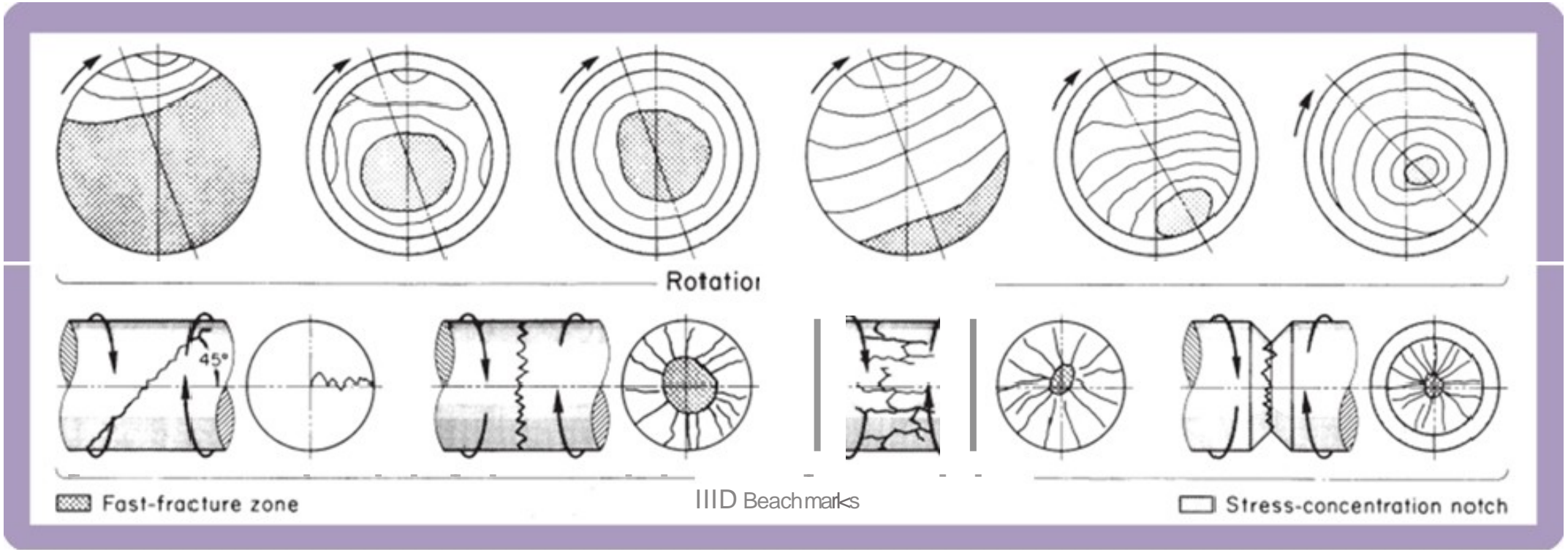


Şekil 7-2 Çeşitli yükleme koşulları ve nominal gerilme seviyeleri altında yuvarlak ve dikdörtgen kesitli düz ve çentikli bileşenlerde üretilen yorulma kırılma yüzeylerinin şeması



İki yönlü eğme

Şekil 7-3 çeşitli yükleme koşullarında ve nominal gerilme seviyelerinde yuvarlak ve dikdörtgen kesitli düz ve çentikli bileşenlerde oluşan yorulma kırılma yüzeylerinin şematize görünüşleri.



Şekil 7-4

Çeşitli yükleme koşulları ve nominal gerilme seviyeleri altında yuvarlak ve dikdörtgen kesitli düz ve çentikli bileşenlerde üretilen yorulma kırılma yüzeylerinin şeması

(From ASM Handbook, Vol. 11: Failure Analysis and Prevention, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, Fig18, p. 111. Reprinted by permission of ASM International®, www.asminternational.org.)